



Pro gradu -tutkielma
Meteorologia

Paikallisten tekijöiden vaikutus tienpinnan lämpötilaan

Virve Karsisto

15.10.2013

Ohjaaja: Marjo Hippi, Heikki Järvinen

Tarkastajat: Heikki Järvinen, Markku Kangas

HELSINGIN YLIOPISTO
FYSIIKAN LAITOS

PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2)
00014 Helsingin yliopisto

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty		Laitos — Institution — Department	
Matemaattis-luonnontieteellinen		Fysikaalisten tieteiden laitos	
Tekijä — Författare — Author			
Virve Karsisto			
Työn nimi — Arbetets titel — Title			
Paikallisten tekijöiden vaikutus tienpinnan lämpötilaan			
Oppiaine — Läroämne — Subject			
Meteorologia			
Työn laji — Arbetets art — Level		Aika — Datum — Month and year	
pro gradu		Lokakuu 2013	
		Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages	
		48 s. + liite 1 s.	
Tiivistelmä — Referat — Abstract			
<p>Paikallisilla tekijöillä voi olla merkittävä vaikutus tienpinnan lämpötilaan. Työssä käydään läpi näitä tekijöitä ja tutkitaan niiden vaikutusta Ilmatieteen laitoksen tiesäämalliin. Herkkyyskokeilla tutkittuja paikallisia tekijöitä ovat tienpinnan albedo, päällysteen paksuus, tien kaltevuus ja varjostus. Tutkimuksessa tiesäämallia ajettiin 16 eri pisteessä käyttäen näitä tekijöitä kuvaaville suureille eri arvoja. Työssä vertaillaan myös tiesääennusteiden luotettavuutta eri paikoissa sijaitseville tiesääasemille. Lisäksi tutkitaan, miten tiesäämallilla voisi mallintaa siltapisteitä.</p> <p>Saatujen tulosten mukaan tärkein tienpinnan lämpötilaan vaikuttava tekijä on varjostus. Suurimmaksi varjostetun ja varjostamattoman pinnan lämpötilaeroksi saatiin 13 °C, mikä tarkoittaa jo merkittävää eroa liukkauden muodostumisen kannalta. Erityisesti auringon siirtyminen esteen taakse iltapäivällä aiheutti nopean lämpötilan laskun. Toiseksi tärkeimpiä tekijöitä ovat päällysteen paksuus ja kaltevuus, joiden merkitys on huomattavasti suurempi aurinkoisina kuin pilvisinä päivinä. Saatujen tulosten mukaan aurinkoisena päivänä päällysteen paksuuden muutos kahdesta senttimetristä kuuteen senttimetriin aiheutti kahden asteen eron vuorokauden suurimman ja pienimmän lämpötilan erotuksissa. Etelärinteen lämpötilan muutokseksi saatiin +0,40 °C kaltevuusastetta kohden ja pohjoisrinteen -0,46 °C kaltevuusastetta kohden. Pienin vaikutus tienpinnan lämpötiloihin aiheutui albedon muuttamisesta, jolla saatiin suurimmillaankin vain yhden asteen lämpötilaero.</p> <p>Tiesääennusteiden luotettavuudessa ei havaittu olevan eroa tasaisella maalla sijaitsevien tiesääasemien ja sillalla tai mäessä sijaitsevien tiesääasemien välillä. On kuitenkin mahdollista, että mallille annetun sääennusteen virheet peittivät paikallisten tekijöiden aiheuttamat erot alleen. Myös tiesäämallin taipumus ennustaa todellista kylmempiä lämpötiloja haittasi vertailua. Sillan lisääminen malliin onnistui muutamilla muutoksilla. Tämä muutti kuitenkin pintalämpötilaa enimmilläänkin vain 1,5 °C. Eri paksuisten siltojen lämpötilaprofileilla oli eroa, sillä 20 cm paksuisen sillan keskiosan lämpötila mukautui paljon nopeammin lämpötilan muutoksiin kuin 50 cm ja 100 cm paksuisilla silloilla, joilla lämpötilaprofilista tuli aaltomaisempi.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords			
tien lämpötila, tiesää, tiesäämallinnus, herkkyyskoe			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited			
Kumpulan tiedekirjasto			
Muita tietoja — övriga uppgifter — Additional information			

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. PAIKALLISTEN TEKIJÖIDEN VAIKUTUS LÄMPÖTILAAN	2
2.1 Säteilyyn vaikuttavat tekijät	4
2.2 Topografian, ympäristön ja tien ominaisuuksien vaikutus	12
3. TIESÄÄMALLI	14
3.1 Mallin kuvaus	14
3.2 Energiatasapaino maalla	15
3.3. Energiatasapaino sillalla	17
4. ENNUSTE- JA HAVAINTOAINEISTOT	18
4.1 HARMONIE	18
4.2 Tiesääasemat	18
4.3 Tutkittavat päivät	20
5. MENETELMÄT JA TULOKSET	22
5.1 Tienpintalämpötilan osuvuus eri asemilla	22
5.1.1 Menetelmät	22
5.1.2 Tulokset	23
5.2 Albedo	27
5.2.1 Menetelmät	27
5.2.2 Tulokset	27
5.3 Päällysteen paksuus	28
5.3.1 Menetelmät	28
5.3.2 Tulokset	28
5.4 Kaltevuus	30
5.4.1 Menetelmät	30
5.4.2 Tulokset	31
5.5 Varjostus	34
5.5.1 Menetelmät	34
5.5.2 Tulokset	35
5.6 Silta	37
5.5.1 Menetelmät	37
5.5.1 Tulokset	38
6. YHTEENVETO	41

KIITOKSET	44
KIRJALLISUUSLUETTELO	45
LIITE A : Suomen tiesääasemat	

1. JOHDANTO

Tien sijainnilla on suuri vaikutus sen pinnan lämpötilaan. Siihen vaikuttavat mm. ympäristön avoimuus, tien rakenne ja kaltevuus sekä ympäristön korkeuserot. Ilmatieteen laitoksen tiesäämalli on suunniteltu ennustamaan tienpinnan lämpötilaa ja keliin liittyviä parametreja keskimääräisissä olosuhteissa eikä se ota paikallisten tekijöiden vaikutusta huomioon. Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää erilaisten paikallisten tekijöiden vaikutusta lämpötilaan ja tutkia tiesäämallin herkkyyttä näille tekijöille. Tutkimuksen kohteena ovat tien kaltevuuden, avoimuuden, pinnan albedon ja päällysteen paksuuden vaikutus. Myös tienpinnan lämpötilaennusteiden tarkkuutta eri paikoissa sijaitsevilla asemilla vertaillaan. Lopuksi selvitetään, miten tiesäämallilla voisi mallintaa siltapisteitä.

Aikaisempien tutkimusten perusteella voidaan todeta, että paikallisten tekijöiden vaikutuksen tutkiminen on tienpinnan liukkauden ennustamisen kannalta tärkeää. On hyvä tietää, kuinka paljon eri tekijät vaihtelevat tiestön eri osissa ja kuinka paljon näiden tekijöiden vaikutuksen lisäämisellä on vaikutusta tiesäämallin ennustamiin lämpötiloihin ja muihin suureisiin, kuten kitkaan. Tutkimustuloksia voidaan myöhemmin myös hyödyntää paikallisten tienpintalämpötilojen ennustamisessa ja tiesäämallin soveltamisessa seuduille, joiden maasto poikkeaa Suomen maastosta.

Ilmatieteen laitoksen tiesäämallin herkkyyttä paikallisille tekijöille ei ole aikaisemmin tutkittu kovinkaan tarkasti. Coldspots-hankkeessa (Saarikivi ym. 2007) testattiin tien kaltevuuden vaikutusta lämpötilaan lisäämällä mallissa pinnan saamaa säteilyä, mutta tässä tutkimuksessa selvitetään mallin herkkyyttä tälle tekijälle laajemmin. Tien avoimuuden, päällysteen paksuuden ja pinnan albedon vaikutuksesta tiesäämallissa ei ole tehty juuri lainkaan herkkyystudkimusta, joten niiden suhteen tämä tutkimus tarjoaa uutta tietoa. Myöskään Ilmatieteen laitoksen mallin soveltamista sillalle ei ole aikaisemmin testattu, joten siitä saatu lisätieto on erityisen tärkeää.

Joissain tilanteissa asteenkin erolla voi olla merkitystä tien pinnan liukkauden kannalta. Tällainen tilanne on esimerkiksi silloin, kun lämpötila on juuri nollan yläpuolella. Jos pinta esimerkiksi saakin jostain syystä vähemmän auringon säteilyä, jäätä voi alkaa muodostua ja aiheuttaa liukkautta. Erolla voi olla merkitystä tienhoidon kannalta myös kun lämpötila on joitain asteita nollan alapuolella, sillä silloin se voi vaikuttaa teiden suolaamispäätökseen. Teiden suolaaminen ei nimittäin tehoa liukkauden torjuntaan kun lämpötila on liian alhainen. Suomessa suolauksen rajalämpötila on seitsemän pakkasastetta. (Tiehallinto, 2001). Muissa lämpötiloissa muutaman asteen heilahtelulla ei ole kovin paljoa merkitystä tien kunnan kannalta.

Tarkkojen tiesääennusteiden tuottaminen on tärkeää, sillä niillä voidaan pienentää teiden talvihoidon kustannuksia ja ehkäistä onnettomuuksia. Teiden talvihoidon kustannukset talvikaudella 2007-2008 olivat 97 miljoonaa euroa ja vuonna 2008 maanteillä tapahtui yli 3500 onnettomuutta (Tiehallinto, 2009). Tarkoilla ennusteilla voidaan optimoida suolauksen ja auroituksen ajankohtia ja näin pienentää kustannuksia. Tien suolaaminen kannattaa ajoittaa muutamaa tuntia ennen jäätymistä, sillä silloin suolaa tarvitaan liukkauden estoon vähemmän kuin tien jo jäädyttyä (Tiehallinto, 2001). Kun liukkautta pystytään ehkäisemään ja huonosta ajokelistä tiedottamaan mahdollisimman hyvin, myös onnettomuudet vähenevät.

2. PAIKALLISTEN TEKIJÖIDEN VAIKUTUS LÄMPÖTILAAN

Tienpinnan lämpötilan ennustaminen on haastavaa, sillä siihen vaikuttavat paikalliset tekijät. Suomen tiesääasemilla on havaittu, että tiesääasemien välillä voi olla parin asteen lämpötilaero, vaikka niiden etäisyys olisi vain muutama kilometri (Saarikivi ym., 2007). Talvella pintalämpötilat voivat erota tieverkoston eri osissa jopa 10 °C (Shao ym., 1997). Samansuuruinen lämpötilaero on havaittu myös Suomessa tehdyssä mobiilimittauksessa (Saarikivi ym. 2007). Tienpinnan lämpötilaan vaikuttavia tekijöitä on esitelty taulukossa 2.1. Tekijät voidaan jakaa meteorologisiin, maantieteellisiin ja tien rakenteesta johtuviin. Meteorologisia tekijöitä ovat auringonsäteily, maan ja ilmakehän emittoima pitkäaaltoinen säteily ja muut säähän liittyvät suureet. Näihin suureisiin vaikuttavat maantieteelliset tekijät, kuten paikan leveyspiiri, korkeus merenpinnasta, ympäristön korkeuserot, maankäyttö ja varjostukset. Tien rakenne määrää, miten tienpinnan lämpötila reagoi sään muutoksiin. Tähän vaikuttavat mm. päällysteen ja pohjustuksen rakenne ja paksuus sekä pinnan heijastuskyky eli albedo. Paikallisten tekijöiden vaikutusta on kuitenkin hankala verifioida, sillä tiesäähavaintoja ei ole tarjolla kaikkialta.

Meteorologiset	Maantieteelliset	Tien ominaisuudet
Auringon säteily	Leveyspiiri	Rakenteiden syvyys
Maan säteily	Korkeus	Lämmönjohtavuus
Ilmakehän säteily	Topografia	Lämmön diffusioituminen
Ilman lämpötila	Varjostus	Emissiviteetti
Pilvisyys	Taivaan näkyvyys	Albedo
Tuulen nopeus	Maankäyttö	Liikenne
Kosteus/kastepiste	Topografinen altistus	
Sademäärä		

Taulukko 2.1. Tienpinnan lämpötilaan vaikuttavat paikalliset tekijät. (Thornes ja Shao, 1991; Hippi ym., 2008)

Jään muodostumista on vaikea ennustaa, sillä tiellä olevan veden määrän vaikuttavat tekijät eivät ole lineaarisia ja vaihtelevat paljon paikan mukaan (Greenfield ja Takle, 2006). Muun muassa sadekuurot haittaavat jään muodostumisen ennustamista, sillä ne ovat hyvin paikallisia. Myös rintamasateiden reitin ja sademäärän ennustamisessa voi olla virhettä. Maaston muodot saattavat aiheuttaa sen, että vesi valuu pois joistain paikoista ja kasaantuu toisiin. Nämä tekijät aiheuttavat liukkauden ennustamiselle haasteita.

Paikallisten tekijöiden vaikutuksesta lämpötilaan on tehty aikaisemmin melko tarkkaa tutkimusta. Bogren ym. (2000b) tutkivat tienpinnan lämpötilan vaihteluita erilaisissa mikroilmastoissa ja säätilanteissa. Tutkimus käsitti 35 mittausasemaa 160 x 130 km² kokoisella alueella Ruotsissa. Tutkimuksen mukaan lämpötilavaihtelut eri pisteissä on mahdollista laskea topografisen sijainnin ja säätekijöiden perusteella. Toisessa tutkimuksessa Ruotsissa Eriksson ja Norrman (2001) selvittivät paikallisten tekijöiden vaikutusta tien erityyppisten liukkaustilanteiden esiintymiseen multiregressioanalyysillä ja totesivat vaikutuksen merkittäväksi.

Chapman ym. (2001a ja 2001b) tekivät tutkimuksen, jossa tienpinnan lämpötilaa mallinnettiin maantieteellisen tiedon perusteella. Tutkimuksessa oli kaksi osaa, joista toisessa lämpötilaa mallinnettiin tilastollisesti ja toisessa numeerisesti. Tutkimus käsitti kahdeksan erilaista termiä, jotka olivat leveyspiiri, korkeus meren pinnasta, taivaankannen näkyvyys, varjostus, rosoisuus, tien rakenne, liikennetiheys ja topografia. Tutkimuksen ensimmäisessä osassa kerättiin tietoa erään tieosuuden lämpötilan vaihteluista lämpökameran avulla ja topografiasta erityisesti taivaankannen näkyvyyden osalta. Taivaankannen näkyvyyttä mitattiin ottamalla kalansilmäobjektiivilla kuvia ja arvioimalla näkyvän taivaankannen osuus kuvien perusteella. GPS-tiedoista voitiin selvittää korkeusvaihtelut ja lisäksi tutkimuksessa kerättiin tietoa maankäytöstä ja tien rakenteesta. Regressioanalyysillä tutkittiin näiden eri parametrien merkitystä tienpinnan lämpötilaan ja havaittiin, että tilastollinen malli kykeni selittämään huomattavan osan lämpötilan vaihteluista näiden avulla. Myös tutkimuksen numeerisessa osassa päästiin samansuuntaiseen lopputulokseen, jonka mukaan 72 % pintalämpötilan vaihteluista kyettiin selittämään projisoimalla maantieteellisten termien vaikutus lämpötilakenttään.

Aikaisemmin paikallisten tekijöiden vaikutusta lämpötilaan Suomessa on tutkittu Coldspots-hankkeessa (Saarikivi ym., 2007). Hankkeen tavoitteena oli kehittää tarkkoja tiekohtaisia keliennusteita hankkimalla tietoa erityisen liukkaiksi havaituista tiestön pisteistä ja kehittämällä tiesääennusteita tekeviä malleja. Tietoa hankittiin mm. tieprofiileista, vesistöjen läheisyydestä, metsien ja aukeiden sijainneista ja taivaankannen näkyvyydestä. Apua selvitykseen saatiin myös tienhoidon ammattilaisilta, joilla oli kokemusta erityisen liukkaiden paikkojen sijainneista. Tutkimuksessa todettiin, että paikalliset lämpötila- ja kitkavaihtelut voivat olla huomattavan suuria ja että parempien ennusteiden kehittämiseksi tarvittaisiin kiinteiden asemien lisäksi liikkuvia mittausjärjestelmiä.

2.1 Säteilyyn vaikuttavat tekijät

Suoran auringonsäteilyn tiellä olevat esteet vaikuttavat säteilyvoihin pinnalla (Chapman ym., 2001a). Jos esimerkiksi tiesääseman ympärillä on metsää, niin aurinko voi olla näkyvissä vähemmän aikaa kuin laajalla aukealla. Esteen koko, muoto ja sijainti vaikuttavat varjostuksen ajankohtaan ja keston. Ne haittaavat myös pilvistä ja ilmakehän kaasuista lähtevän lämpösäteilyn pääsyä pinnalle, estävät maasta lähtevän pitkäaallosäteilyn karkaamista avaruuteen ja luovuttavat omaa lämpösäteilyään tielle.

Tyypillisiä varjostuksen aiheuttajia ovat metsien lisäksi kalliit (Bogren, 1991). Varjoisat alueet saavat siis vähemmän säteilyä kuin aurinkoiset ja siksi tienpintalämpötila on varjoisilla alueilla pienempi päiväsaikaan. Pienemmän ulossäteilyn vuoksi tilanne saattaa olla yöllä päinvastainen, sillä lämpöä karkaa avaruuteen enemmän aukealla kuin varjoisalla alueella. Varjostuksen vaikutus on merkittävä jopa pilvisinä päivinä, joina pilvisyys on 4/8-6/8 edellyttäen, että aurinko on tarpeeksi korkealla. Vielä auringon laskun jälkeenkin kestää muutamia tunteja ennen kuin lämpötilaerot tasaantuvat (Bogren ym., 2000a). Paikallisen tienpinnan lämpötilan ennustamiseksi on siis tärkeää tuntea tien varjostukseen vaikuttavat tekijät. Taivaan näkyvyyttä tietyssä pisteessä kuvataan avonaisuuskertoimella (englanniksi sky-view factor). Sen arvo vaihtelee yhdestä nollaan. Yksi kuvaa sitä, että koko taivas on näkyvissä ja nolla puolestaan sitä, että taivasta ei näy lainkaan (Chapman ym., 2001a). Saatu nettosäteily saadaan kertomalla säteilykomponentit avoimuuskertoimella (Senkova ym., 2007).

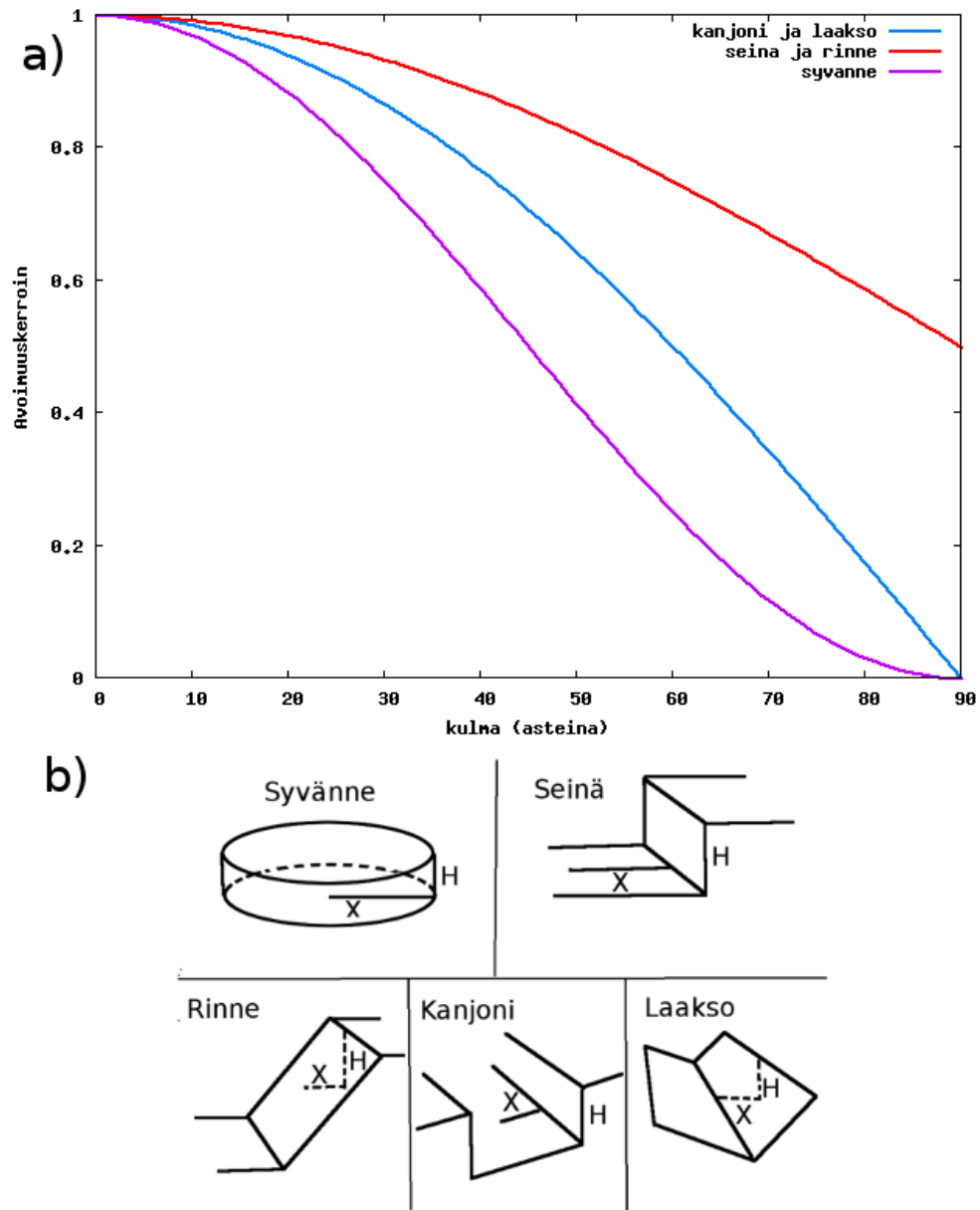
Täysin suljetun syvänteän keskipisteen avoimuuskerroin voidaan laskea kaavalla:

$$f_{sky} = \cos^2 \beta, \quad (1)$$

missä β tarkoittaa horisontin ja vaakatason välistä kulmaa (Oke, 1987). Se voidaan laskea yhtälöllä

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{H}{X} \right), \quad (2)$$

missä H on syvänteän korkeus ja X on syvänteän reunan etäisyys keskipisteestä. Yhtälöä voidaan soveltaa myös laskettaessa avoimuuskerrointa metsäaukealla, jolloin H on puiden korkeus (Oke, 1987). Seinän tai rinteen lähellä olevan pisteen avoimuuskerroin voidaan puolestaan laskea yhtälöllä:



Kuva 2.1. a) Avonaisuuskertoimen arvot kulman β funktiona. β tarkoittaa näkyvän taivaan rajan ja maan välistä kulmaa. Sinisellä on avonaisuuskertoimen kanjonin tai laakson keskellä olevalle pisteelle, punaisella seinän tai rinteiden vieressä sijaitsevalle pisteelle ja violetilla syvängin keskellä olevalle pisteelle. b) Havainnollistukset maaston muodoista.

$$f_{sky} = \frac{1 + \cos(\beta)}{2}. \quad (3)$$

Jos pisteen kummallakin puolella on rinne tai seinä, avoimuuskertoimen arvo on yksinkertaisesti $\cos(\beta)$. Yhtälöissä on oletettu, että rinteet ja seinät ovat äärettömän pitkiä (Oke, 1987). Kuvassa 2.1 on esitetty näillä yhtälöillä laskettuja taivasnäkyvyysskertoimia β :n funktiona ja havainnollistavia kuvia yksinkertaistetuista maantieteellisistä sijainneista.

Monimutkaisemmissa maastoissa avoimuuskerroin on mahdollista määrittää kalansilmäobjektiivilla otetuista kuvista (Oke, 1987). Kuvassa 2.2 on esimerkki tällaisesta kuvasta.



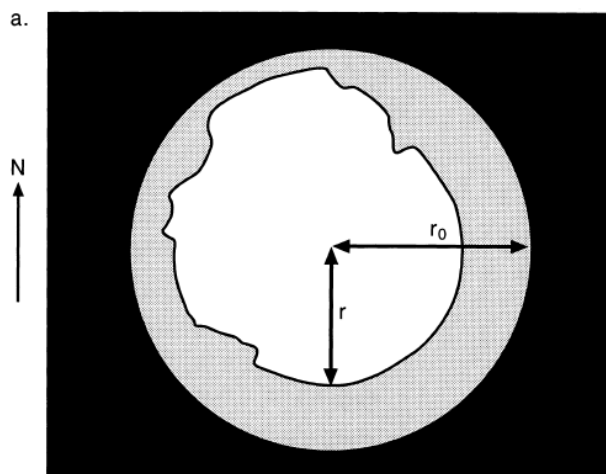
Kuva 2.2. Kalansilmäobjektiivilla otettu kuva kaupungissa. (Chapman ym., 2001a).

Taivasnäkyvyyskerroin ei kuitenkaan yksinään kerro, saako paikka suoraa auringon säteilyä vai ei. Chapman ym. (2001c) esittivät menetelmän, jolla määrittäminen voidaan tehdä automaattisesti ja nopeasti. Menetelmä perustuu kalansilmäobjektiivilla otetun kuvan jakamiseen 5° kokosiin osiin ja näistä taivaan näkyvyys säteen laskemiseen (Chapman ym., 2001b). Näkyvyys sädetä on havainnollistettu kuvassa 2.3. Tuloksena saadaan 72 arvoa, joista voidaan laskea esteen peittokulma kaavalla:

$$\varphi = \frac{r\pi}{2r_0}, \quad (4)$$

missä r on peittosäde ja r_0 on kuvan säde. Kun auringon atsimuuttikulma ja zeniittikulma tiedetään, on peittokulmien avulla helppo selvittää, jääkö aurinko esteen taakse vai ei (Chapman ym., 2001b).

Tielle tulevat varjostukset vaikeuttavat sen pintalämpötilan ennustamista. Varjostusten mukaan ottaminen malliin on kuitenkin hankalaa, sillä ne vaihtelevat paikan lisäksi myös ajallisesti. Esimerkiksi puiden lehdet putoavat syksyllä, metsää voidaan hakata tai tien varteen rakentaa taloja. Avonaisuuskertoimen mukaan ottaminen edellyttäisi aluksi laajamittaista kartoitustyötä ja sitten sen jatkuvaa ajan tasalla pitämistä. Loppukeväällä varjostuksen vaikutus lyhytaaltoiseen säteilyyn on merkittävämpi kuin pitkäaaltoiseen, mutta loppusyksystä uloskarkaavan pitkäaaltoisen säteilyn vähenemisen merkitys kasvaa. Myöhään syksyllä voidaan siis havaita keskimääräistä lämpimämpiä lämpötiloja varjostetuilla alueilla (Lauros, 2001).



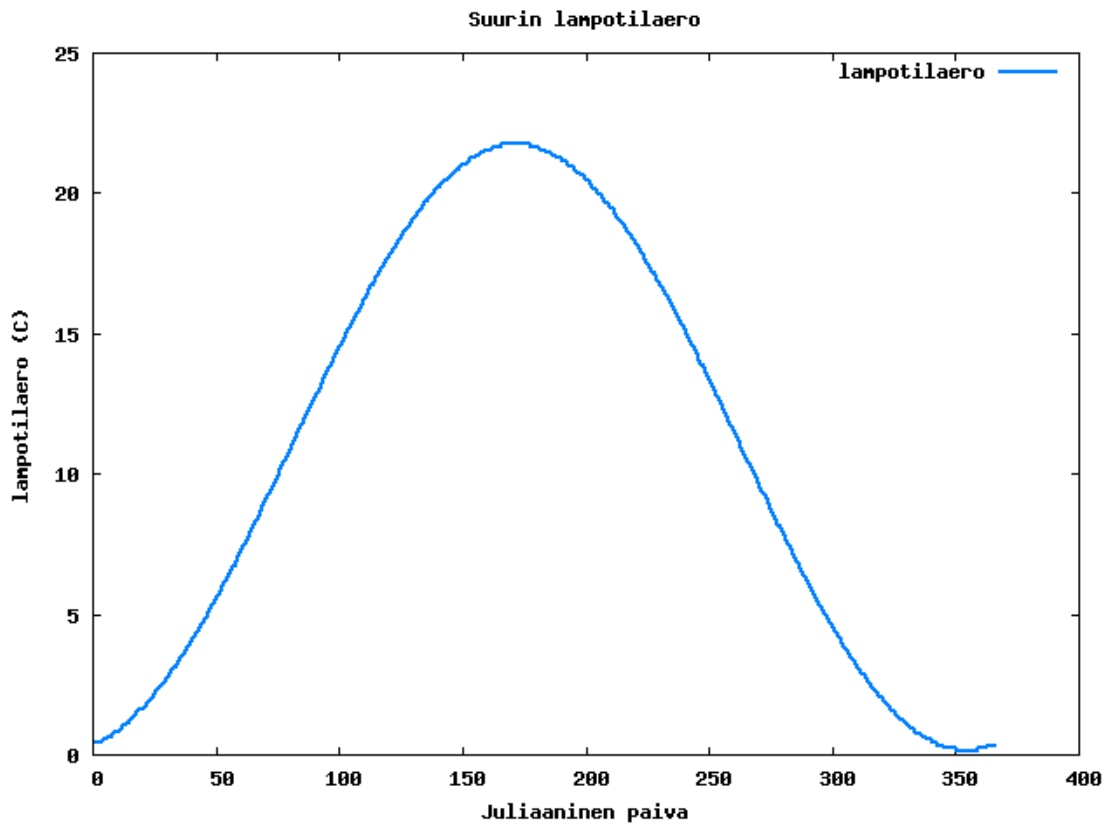
Kuva 2.3. Taivaan näkyvyys säteen määrittäminen kuvasta. r on näkyvyys säde ja r_0 on kuvan säde. N osoittaa pohjoisen suunnan. (Chapman ym., 2001b).

Bogren ym. (2000a) kehittivät havaintojen perusteella parametrisoinnin varjostetun ja avonaisen tienpinnan lämpötilan maksimierotukselle:

$$T_{avoin} - T_{varjostettu} = -2,7 + 0,46\gamma. \quad (5)$$

Yhtälössä T_{avoin} tarkoittaa avoimen ja $T_{varjostettu}$ varjostetun alueen tienpinnan lämpötilaa ja γ auringon elevaatiokulmaa keskipäivällä. Parametrisointia tehdessä on oletettu, että asfaltti on musta, maasto on tasainen ja sää on selkeä. Yhtälön johtamiseen käytettiin havaintoja varjostamattomien ja varjostettujen alueiden lämpötilaeroista. Varjostetuiksi laskettiin sellaiset paikat, jotka olivat selvästi varjossa iltapäivällä. Kuvassa 2.4 on yhtälön antamat lämpötilaerot Helsingin leveyspiirille koko vuoden ajalta. Talvella lämpötilaero on muutamia asteita, kun taas keväällä ero vaihtelee maaliskuun noin seitsemästä asteesta toukokuun noin 18 asteeseen. Syksyllä lämpötilaero vaihtelee syyskuun noin 15 asteesta marraskuun noin kolmen asteen eroon.

Maanpinnan saaman säteilyn määrä riippuu avonaisuuskertoimen lisäksi suuresti pinnan normaalin kulmasta suoraan auringon säteilyyn. Mikäli aurinko paistaa matalalta kirkkaalla ilmalla, voi etelään päin kalteva pinta saada jopa moninkertaisen määrän auringon säteilyä verrattuna tasaiseen pintaan. Vastaavasti pohjoiseen päin kalteva pinta voi saada säteilyä paljon vähemmän. Pilvisessä tilanteessa hajasäteilyn suhteellinen osuus kasvaa ja mäen kaltevuuden vaikutus pienenee. Coldspots-hankeessa kokeiltiin kallistuksen lisäämistä Ilmatieteen laitoksen tiesäämalliin auringon korkeuskulman kautta (Saarikivi ym., 2007). Normaaaleilla teiden kaltevuuskulmilla saatiin näin kuitenkin vain muutamien asteiden eroja. Muutamienkin asteiden erot voivat kuitenkin olla merkittäviä kun lämpötila on lähellä nollaa, joten mäen kaltevuuden vaikutuksen tutkiminen on tärkeää rajatilanteiden paremman ennustamisen kannalta. Kaltevuuden merkitys kasvaa huomattavasti vuoristoisemmilla alueilla, joilla lisäksi



Kuva 2.4. Suurin lämpötilaero keskipäivällä varjostetun ja varjostamattoman tienpinnan välillä. (Bogren ym., 2000a)

varjostukset ovat merkittävämpiä. Mikäli tiesäämallia halutaan soveltaa vuoristoiselle tielle, on kaltevuuden huomioiminen tärkeää.

Kaltevan pinnan saama auringon säteily voidaan laskea kaltevuuskertoimen avulla:

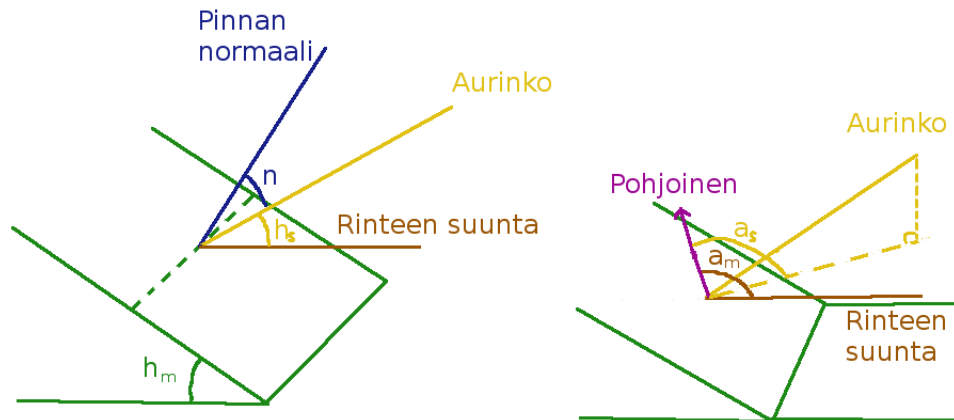
$$S_{rinne} = f * S_{tasainen}, \quad (6)$$

missä S_{rinne} on rinnettä kohtisuoraan oleva säteilykomponentti, f on kaltevuuskerroin ja $S_{tasainen}$ on tasaista pintaa kohtisuoraan tuleva säteilykomponentti (Müller ja Scherer, 2005). Kaltevuuskerroin voidaan laskea seuraavasti:

$$f = \left[1 + \frac{\tan(h_m)}{\tan(h_s)} \cos(a_s - a_m) \right], \quad (7)$$

missä h_m on mäen kaltevuuskulma, h_s on auringon korkeuskulma, a_s on auringon atsimuuttikulma ja a_m on mäen kaltevuuden suunta (Senkova ym. 2007). Kulmat a_s ja a_m

määritellään siten, että pohjoinen on 0 astetta ja ne kasvavat myötäpäivään. Etelää tarkoittaa kulma 180 astetta. Eri kulmien merkitystä on havainnollistettu kuvassa 2.5 ja kuvassa 2.6 on yhtälöllä 7 laskettuja kaltevuuskertoimia päivälle 15.3.2013

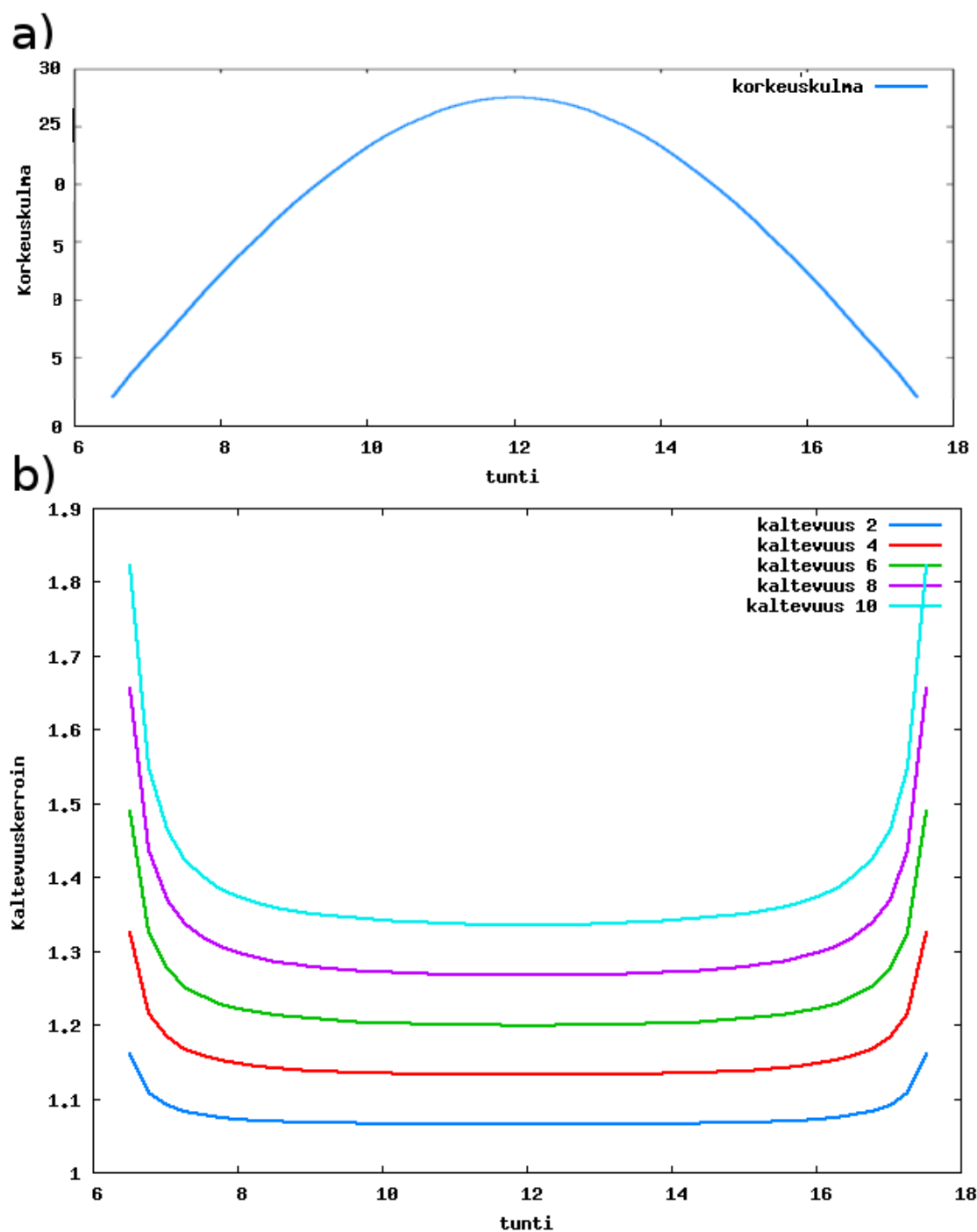


Kuva 2.5. Kaltevuuskertoimen laskemiseen tarvittavia kulmia. h_m on mäen kaltevuuskulma, h_s on auringon korkeuskulma, a_s on auringon atsimuuttikulma ja a_m on mäen kaltevuussuunta. n tarkoittaa kulmaa auringonsäteiden ja pinnan normaalin välillä.

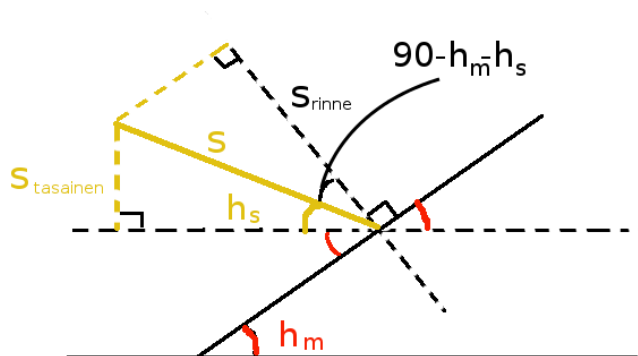
Yhtälö 7 kuitenkin yliarvioi kaltevuuskerrointa rinteiden kaltevuuskulman ollessa suuri. Mikäli aurinko paistaa rinteeseen suuntaisesti ja rinteeseen normaalin alapuolelta, voidaan kaltevuuskertoimelle johtaa kaava:

$$f = \frac{\cos(90^\circ - h_m - h_s)}{\sin(h_s)}. \quad (8)$$

Tämä saadaan yksinkertaisen geometrian avulla, joka on esitelty kuvassa 2.7. Tasaiselle pinnalle tuleva säteily on $\sin(h_s) \cdot S$, missä S tarkoittaa auringon säteen suuntaista säteilyä, kun taas kaltevalle pinnalle tuleva säteily on $\cos(90^\circ - h_s - h_m) \cdot S$. Yhtälö 8 saadaan sijoittamalla edelliset yhtälöön 6. Kun rinteiden kaltevuuskulma on 60° ja auringon korkeuskulma 27° yhtälö 7 antaa kaltevuuskertoimen arvoksi 4,4, mikäli aurinko paistaa rinteeseen suuntaisesti. Yhtälöllä 8 saadaan kaltevuuskertoimeksi tällöin vain 2,2. Pienillä auringon korkeuskulmilla yhtälö 8 antaa kuitenkin epärealistisia tuloksia, sillä jakajan sini-termi lähestyy nollaa.



Kuva 2.6. a) Auringon korkeuskulma leveyspiirillä 60°N 15.3.2013 ajan funktiona. Tunnit kuvaavat paikallista aikaa. b) Kaltevuuskertoimet samana ajankohtana rinteiden kaltevuuden ollessa 2° - 10° etelään.



Kuva 2.7. Kaltevuuskertoimen laskeminen auringon paistaessa rinteeseen suuntaisesti rinteeseen normaalin alapuolelta

Kaltevuuskulmien ollessa pieniä yhtälö 7 sopii hyvin kaltevuuskertoimen laskemiseen, ja Suomen teille tämä ehto täyttyy hyvin. Tien kaltevuutta kuvataan yleensä kaltevuusprosentilla, joka saadaan laskettua kaavalla:

$$K = \frac{\Delta h}{\Delta x} * 100, \quad (9)$$

missä Δh tarkoittaa korkeuden muutosta ja Δx vastaavaa etäisyyden muutosta. Helsingin kaupungin kaupunkisuunnitteluviraston ja liikennesuunnitteluviraston antamien katupoikkileikkausten suunnitteluohjeiden mukaan pääkadulla suurin sallittu kaltevuusprosentti on 8 %. Tämä vastaa $4,6^\circ$ kaltevuuskulmaa. Poikkeustapauksissa tonttikadun pituuskaltevuus voi olla 12 %, mikä vastaa $6,8^\circ$ kaltevuutta (Alastalo ym., 2001). Suomessa on virallinen liikennemerkki varoittamaan 7 % kaltevuudesta. Yleisesti kaltevuudet Suomen teillä ovat melko pieniä. Kevyen liikenteen väylien yksi jyrkimmistä mäistä on Jussinparran mäki, joka sijaitsee Jyväskylän Keltinmäessä. Jyrkimmissä kohdissa mäen pituuskaltevuus on 18 % (Kivinen, 2011).

Ilmatieteen laitoksen sääennustusmallissa HIRLAM:ssa (High Resolution Limited Area Model, Unden ym., 2002; www.hirlam.org) kaltevuuden vaikutus säteilyyn on otettu huomioon käyttäen kaltevuuskerrointa, ja siinä on myös parametrisoitu mahdolliset varjostukset. Näiden parametrisointien todettiin muuttavan paikallisia kokonaissäteilyvoita maksimissaan 50 – 100 W/m² ja paikallisia lämpötiloja 1 – 3 °C (Senkova ym., 2007). HIRLAM:in hilaruuden koko, joka on 7,5 km x 7,5 km ei kuitenkaan riitä kuvaamaan paikallisten mäkien vaikutusta tiesäähän Suomessa. Vuoristoisemmilla alueilla erotuskyky ei riitä vuoristoteiden kaltevuuksien kuvaamiseen. Tässä tutkimuksessa selvitetään, miten mäen kaltevuuden vaikutus tienpinnan lämpötilaan voitaisiin ottaa tiesäämallissa huomioon ja kuinka suuri tämä vaikutus mallissa on.

2.2 Topografian, ympäristön ja tien ominaisuuksien vaikutus

Jopa pienet korkeuserot maastossa voivat aiheuttaa ilman ja tienpinnan lämpötilan vaihtelua. Tienpinnan lämpötila laskee yleisesti korkeuden mukana, mutta mitään yleistä riippuvuutta tästä ei voida esittää (Shao ym., 1997). Korkeuden merkitys riippuu säätilasta, sillä pilvisellä säällä se vaikuttaa enemmän tienpinnan lämpötilaan kuin kirkkaina ja tuulisina. Selkeällä säällä turbulenttinen sekoittuminen ja vastasäteily tasoittavat lämpötilaeroja (Lauros, 2001). Korkeuden vaikutus riippuu myös ilman stabiiliudesta. Kun ilma on stabiilia, niin yöllä kylmä ilma valuu tiheämpänä laakson pohjiin. Tätä kutsutaan katabaattiseksi virtaukseksi. Tällöin ylempänä on lämpötilainversio ja ilma on siellä lämpimämpää. Tällainen tilanne voi kuitenkin syntyä vain heikoilla tuulen voimakkuuksilla, mitkä eivät aina suinkaan toteudu. Laakson muoto vaikuttaa suuresti siellä vallitseviin tuuliin (Chapman ym., 2001a). Suojaisissa laaksoissa tuulen voimakkuudet ja turbulenttinen lämmönvuo ovat pienempiä ja yölliset lämpötilatkin ovat suhteellisen matalia (Thompson, 1986). Alhaisimmat tienpintalämpötilat havaitaan monesti laakson pohjissa (Chapman ym., 2001a).

Kaupungissa ja maaseudulla tienpinnan lämpötilaolot voivat olla hyvinkin erilaiset. Kaupungeissa rakennukset luovuttavat lämpöä, mikä hidastaa tien yöllistä jäähtymistä (Oke ym. 1991). Rakennukset myös estävät säteilyn karkaamista avaruuteen peittäen taivaan näkyvistä. Turbulenssi ja samalla turbulenttinen lämmönvuo riippuu alustan rosoisuudesta, joka vaihtelee paljon kaupungin ja maaseudun välillä. Rosoisuusparametrilla kuvataan sitä korkeutta, jossa logaritminen tuuliprofiili lähestyy nollaa (Oke, 1987). Sen yläpuolella tuuliprofiili lähestyy logaritmisesti vapaan ilmakehän tuulen nopeutta. Mitä rosoisempi maasto on, sitä suurempi on rosoisuusparametri ja sitä enemmän turbulenssia esiintyy. Kaupungissa rosoisuusparametri on huomattavasti suurempi kuin maaseudulla. Rosoisuuden vaikutus ei ole kuitenkaan yksiselitteinen, sillä päivisin tuulen nopeudet ovat yleensä pienempiä suojaisessa kaupungissa kuin maaseudulla, mutta yöllä rosoisuus voimistaa mekaanista sekoittumista ja lisää tuulisuutta. (Barry ja Chorley, 1971).

Myös liikenteen määrä on maaseudulla ja kaupungin lähialueilla erilainen. Liikenteellä on tiehen useita eri vaikutuksia (Kangas ym., 2006). Eräs tärkeimmistä on pinnan läheinen turbulenssi, joka vaikuttaa lämmönvuohon ilman ja tien välillä. Lisäksi liikenne aiheuttaa kulumista ja vaikuttaa tien pinnalla olevan veden, jään, lumen ja kuuran määrään. Auton moottorien lämpösäteilyllä, renkaiden ja tienpinnan välisellä kitkalla ja pakokaasuilla on lämmittävää vaikutusta. Ilmatieteen laitoksen tiesäämallissa on otettu mukaan liikenteen aiheuttama kulumisen ja turbulenssi kokeellisen kertoimen avulla, mutta muu liikenteen vaikutus on jätetty pois, sillä se on oletettu pieneksi (Saarikivi ym., 2007).

Myös teiden talvihoidon vaikutus voidaan lukea mukaan paikallisiin tekijöihin. Suomen tiet on jaettu viiteen eri talvihoitoluokkaan tien vilkkauden mukaan (Tiehallinto, 2001).

Kullekin hoitoluokalle on omat laatuvaatimuksensa toimenpideajan, sallitun polanteen ja lumen määrän ja kitkan suhteen. Korkeamman hoitoluokan omaavilla teillä auraus ja suolaus tulee tehdä aiemmin ja niillä sallitaan vähemmän polannetta ja lunta. Ilmatieteen laitoksen tiesäämallista on kehitetty versio, jossa huomioidaan eri teiden talviluokat ja arvioidaan aurausajankohtia niiden avulla (Hippi, 2004). Aurauksen tapahtuessa tien lumivarasto vähenee mallissa.

Asfaltin ikä vaikuttaa pinnan heijastuskykyyn. Uusi musta asfaltti imee säteilyä itseensä enemmän kuin harmaa ja kulunut. Musta asfaltti kerää siis itseensä enemmän lämpöä. Albedolla kuvataan pinnan heijastuskykyä ja sen suuruus vaihtelee välillä 0-1. Albedon ollessa nolla pinta ei heijasta mitään vaan absorboi kaiken säteilyn ja albedolla yksi pinta taas heijastaa kaiken siihen osuvan säteilyn. Suomen teiden tarkkoja albedoja ei kuitenkaan ole saatavilla ja sitä paitsi ne muuttuvat ajan kuluessa, joten niiden tarkka huomioiminen on tien lämpötilan ennustuksessa hankalaa. Ilmatieteen laitoksen tiesäämallissa käytetään asfaltin albedolle arvoa 0,1. Myös lumelle ja jäälle on mallissa omat albedoarvot. Lumella on huomattavasti suurempi albedo kuin asfaltilla, joten tien saadessa lumipeitteen se ei enää ime itseensä yhtä paljon säteilyä. Lumenkin albedo tosin vaihtelee, vastasataneella lumella se voi olla 0,9, kun taas vanhalle, likaiselle ja märälle lumelle se voi jäädä alle 0,5 (Savijärvi 2000). Myös jääpeite pienentää tienpinnan albedoa.

Paikalliseen tienpinnan lämpötilan kehittymiseen vaikuttaa myös tien päällysteen ja pohjustuksen rakenne. Esimerkiksi moottoritien rakenteet ovat syvempiä kuin pienemmillä teillä, joten moottoritien lämpökapasiteetti on suurempi. Tällöin sillä kestää kauemmin lämmetä, mutta se myös jäähtyy hitaammin (Thornes, 1991). Tien paksuudella onkin merkitystä tienpinnan jäätyvän kannalta.

Tien päällysrakenne koostuu yleensä jonkin tyyppisestä asfaltista. Päällysrakenteen paksuus riippuu tien vilkkaudesta, siitä kuinka kauan tien halutaan pysyvän käyttökunnossa ja tien syvemmästä rakenteesta (Tiehallinto, 2004). Kansasissa Yhdysvalloissa tehdyssä tutkimuksessa mitattiin asfaltin paksuutta yhdessätoista eri pisteessä ja tulokset vaihtelivat välillä 2,5-20 tuumaa, mikä vastaa vaihteluväliä 6,35 -50,8 cm (Roddis ym., 1992). Suomessa päällyskerroksen suositeltu paksuus 4 cm, jos tiellä kulkee alle 1300 autoa vuorokaudessa. Jos taas tien vilkkaus ylittää 14 000 ajoneuvoa vuorokaudessa, niin päällysrakenteen paksuussuositus vaihtelee välillä 10-20 cm (Tiehallinto, 2004). Suomessa tienrakentajat eivät yleensä raportoi tien tekemiseen käytetyistä materiaaleista ja niiden paksuuksista, joten Ilmatieteen laitoksen tiesäämallissa joudutaan turvautumaan kirjallisuudesta löytyviin arvoihin.

Tien lämpömuistiksi kutsutaan sitä aikaa, joka sillä kestää jäähtyä takaisin ympäristön lämpötilaan. Keväisin ja syksyisin tie voi kerätä päivällä niin paljon lämpöenergiaa, että se riittää pitämään tien sulana yön yli (Thornes, 1991). Silloilla lämpömuisti on tyypillisesti lyhyempi tien ohuen rakenteen takia. Silloilla täytyy kuitenkin ottaa huomioon myös muita

tekijöitä. Esimerkiksi sillan alapuolinen vesi voi emittoimallaan lämpösäteilyllä pitää sillan lämpimänä (Thornes, 1991). Vesi voi toisaalta olla myös kylmää, jolloin se jäädyttää. Myös tien pohjustuksella on vaikutusta tienpinnan lämpötilaan. Tämä vaikutus on kuitenkin tiesäämallissa melko pientä, kuten käy ilmi Coldspots-tutkimuksesta (Saarikivi ym., 2007). Hankkeessa muutettiin mm. tiesäämallin maan termisten ominaisuuksien arvoja kirjallisuudesta löytyvien arvojen mukaan. Tämän todettiin aiheuttavan vain asteen kymmenesosan eroja tienpinnan lämpötilaan ja enimmilläänkin ero oli vain yksi aste.

Joen tai muun vesialueen yli kulkeva silta on monesti erityisen herkkä jäätymiselle, sillä lähistöllä on yleensä vettä ja ilma on kosteampaa kuin tavallisella tiellä. Tällöin silta kuuraantuu helposti. Lisäksi silta jäähtyy öisin tavallista tietä nopeammin, jolloin pintalämpötila saavuttaa nopeammin kastepisteen ja pinnalle voi muodostua jäätä. Nopea yöllinen jäähtyminen ja kuuraantuminen pätee myös silloille, jotka eivät ylitä vesialuetta. Vuonna 2008 Suomen maanteilla oli siltoja yli 14 500. Sillan tienpintalämpötilojen ennakoiminen onkin erityisen tärkeää onnettomuuksien välttämiseksi. Lisäksi jatkuva suolaaminen heikentää sillan kuntoa, joten materiaalikustannuksen minimoimiseksi tarkat lämpötilaennusteet ovat tärkeitä, ettei suolauksia tehdä turhaan (Greenfield ja Takle, 2006). Sillan lämpötilan ennustamista hankaloittaa se, että sillan energiatasapaino on erilainen kuin tavallisen tien, joten sille energiatasapaino joudutaan määrittelemään erikseen. Lisäksi sillat ovat erilaisia paksuudeltaan ja rakenteeltaan, joten sillan lämpötilatasapainoa laskevissa malleissa joudutaan tyytymään keskiarvoihin. Ilmatieteen laitoksen tiesäämalli ei sisällä siltapisteiden mallintamista.

3. TIESÄÄMALLI

3.1 Mallin kuvaus

Tässä tutkimuksessa käytettiin Ilmatieteen laitoksen tiesäämallia. Kyseessä on yksiulotteinen energiatasapainomalli, joka tarkastelee pystyulotteista lämmön siirtoa tien ja ilmakehän välillä. (Kangas ym., 2012). Malli ottaa huomioon pinnan laadun, maakerroksen ominaisuudet ja liikenteen vaikutuksen. Mallille annetaan lähtötietona numeerisen sääennustemallin tekemä sääennuste, synoptiset säähavainnot ja mahdolliset tutkahavainnot sateesta sekä mahdollisesti myös tiesääasemien tekemät havainnot. Näiden perusteella malli tekee ennusteen tienpinnan lämpötilasta ja tilasta. Malli antaa tienpinnan tilasta kahdeksan erilaista arviota, jotka ovat kuiva, kostea, märkä, märkä luminen, kuurainen, osittain jäinen, jäinen ja kuiva luminen. Tämän perusteella malli tekee arvion ajokelistä, joka voi olla normaali, huono tai erittäin huono. Operatiivisessa käytössä mallia ajetaan ensin kaksi päivää havainnoilla hyvän lähtötilan saamiseksi ja sitten halutun ennusteaajan numeerisen mallin tekemillä ennusteilla. Ennuste on yleensä päivystävän meteorologin käsittelemä. Ajot tehdään

koko Suomen kattavan 10 km x 10 km kokoisen ruudukon pisteisiin, mutta myös tarkempaa resoluutiota on mahdollista käyttää. Tiesäämallilla on useita sovelluksia, joita käytetään esimerkiksi jalkakäytävien liukkauden ennustamiseen (Kangas ym., 2012) ja teiden hoitotöiden suunnitteluun (Hippi, 2004; Hellinen, 2007). Tutkimuskäytössä mallia voidaan ajaa myös pelkillä havainnoilla (Kangas ym., 2012).

Mallille annettujen lähtötietojen tulee sisältää aikasarjat ilman lämpötilasta, suhteellisesta kosteudesta, tuulen nopeudesta, lyhyt- ja pitkäaaltosäteilystä ja sateesta. Vapaaehtoisena syöttösuurena voidaan antaa myös sateen olomuoto, mutta se voidaan myös selvittää mallissa lämpötilan perusteella. Malli antaa tulosteena tienpinnan lämpötilan, tienpinnan tilan, ajokeliä kuvaavan indeksin, tienpinnan kitkan ja tiedot pinnalla olevan veden, lumen, jään ja kuuran määristä. Viimeiset neljä ovat mallissa erillisissä varastotermeissä, joiden suuruutta eri prosessit muuttavat. Varastojen suuruutta kuvataan niiden sisältämän ekvivalentin vesimäärän mukaan.

Liikenteen vaikutus huomioidaan mallissa siten, että malli pienentää varastotermien suuruutta tai siirtää varaston sisältämää vesimäärää varastosta toiseen. Esimerkiksi lumen varasto pienenee, kun liikenteen aiheuttamat ilmavirtaukset kuljettavat sitä muualle. Tienpinnan lumi myös pakkautuu liikenteen vaikutuksesta jääksi lisäten näin jäävaraston kokoa ja pienentäen lumivarastoa. Muita varastojen kokoa muuttavia mallissa huomioitavia prosesseja ovat sade, sulaminen, jäätyminen, haihdunta ja tiivistyminen. Malli käyttää näiden varastojen suuruutta mm. tienpinnan tilan ja kitkan arviointiin. Kitkan laskenta perustuu havaittuun tilastolliseen riippuvuuteen kitkan, lämpötilan ja eri varastotermien välillä. Riippuvuudet on laskettu käyttäen isoa määrää havaintoja, jotka on tehty Vaisalan DSC111-sensorilla (Vaisala, 2010). Sekä märälle tienpinnalle että lumiselle/jäiselle tienpinnalle on omat yhtälöt. Kuivalle tienpinnalle käytetään vakioarvoa 0,82 (Kangas ym., 2012). Kitkan suhteen olosuhteita pidetään Suomessa normaaleina, jos kitka on yli 0,3. Huonot olosuhteet vallitsevat kitkan ollessa 0,15-0,30 ja erittäin huonot kun kitka on alle 0,15. (Juga ym., 2012; Kangas ym., 2012).

3.2 Energiatasapaino maalla

Pinnan energiatasapainoa voidaan kuvata seuraavan yhtälön avulla:

$$G = I_{net} - H - LE, \quad (10)$$

missä G on lämmön vuo maahan, I_{net} on kokonaissäteily pinnalla, H on havaittavan lämmön vuo ja LE on latentin lämmön vuo. Yhtälössä 10 on syytä panna merkille merkkikonventio. G on positiivinen lämmön siirtyessä maahan, I_{net} kun säteilyä tulee pinnalle enemmän kuin lähtee, H kun lämpöä siirtyy maasta ilmaan ja LE silloin kun kosteutta haihtuu maasta ilmaan.

Tiesäämallin pintalämpötilan laskeminen perustuu tämän yhtälön ratkaisemiseen (Kangas ym., 2012).

Kokonaissäteily lasketaan kaavalla:

$$I_{net} = (1 - \alpha_s)I_G + \varepsilon_s I_L - \varepsilon_s \sigma_{SB} T_s^4, \quad (11)$$

Missä α_s on pinnan albedo, I_G on tuleva lyhytaaltainen säteily, ε_s on emissiviteetti, I_L tuleva pitkäaaltoinen säteily, σ_{SB} Stefan-Bolzmanin vakio ja T_s on pinnan lämpötila. Ensimmäinen termi oikealla puolella kuvaa maahan imeytynyttä lyhytaaltoista säteilyä, toinen termi imeytyvää pitkäaaltoista säteilyä ja viimeinen termi maan emittoimaa lämpösäteilyä.

Maan sisäinen lämpötilajakauma lasketaan mallissa reilun neljän metrin syvyyteen asti. Maa on tiesäämallissa jaettu viiteentoista eripaksuiseen kerrokseen. Ylimpien kerrosten paksuudet ovat ohuimpia, vaihdellen välillä 2 cm -10 cm, sillä siellä lämpötilan vaihtelut ovat kaikkein jyrkimpiä. Alimman kerroksen lämpötilana käytetään klimatologiaan perustuvaa lämpötilaa, joka riippuu sinimuotoisesti vuodenajasta. Pinta- ja maakerrosten ominaisuuksia kuvataan niiden tiheyden, lämmönjohtavuuden, lämpökapasiteetin ja huokoisuuden avulla (Kangas ym. 2006). Lämmönvuo maahan voidaan laskea kaavalla:

$$G = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (12)$$

missä λ on maan lämmönjohtavuus, T on lämpötila ja z pystykoordinaatti. Kun lämmönjohtavuus oletetaan vakioksi ja yhtälö 12 yhdistetään jatkuvuusyhtälön kanssa, saadaan:

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (13)$$

missä c on maan lämpökapasiteetti. Tästä yhtälöstä voidaan ratkaista lämpötilan muutos, kun maan lämpötilaprofiili, lämmönjohtavuus ja lämpökapasiteetti tunnetaan (Nysten 1980). Lisäksi ylä- ja alarajalle täytyy olla reunaehdot.

Yhtälön 13 ratkaisumenetelmä ei ole kuitenkaan aivan yksinkertainen, sillä yhtälössä jokaisen kerroksen lämpötila riippuu sekä alemman että ylemmän kerroksen lämpötilasta ja mukana on myös aikariippuvuus. Aluksi yhtälö integroidaan tilavuuden ja aika-askeleen yli (Patankar, 1980). Sitten saatu yhtälö kirjoitetaan muotoon $F(\Delta T)=0$, missä ΔT tarkoittaa lämpötilan muutosta seuraavan aika-askeleen lämpötilaan. Lämpötilan muutoksen saamiseksi käytetään Newton-Raphson menetelmää, jolla voidaan iteratiivisesti selvittää yhtälön nollakohta (Campbell, 1985). Menetelmän aluksi tulee lämpötilan muutokselle tehdä alkuarvaus. Newton-Raphson menetelmää käytettäessä kaikille kerroksille yhtäaikaaisesti päädytään tridiagonaaliseen

yhtälöryhmään, jonka ratkaisemiseen käytetään Thomasin algoritmia (Conte ja Boor, 1980). Tällöin saadaan lämpötilan muutoksesta arvaus seuraavalle Newton-Raphson menetelmän iteraatiokierrokselle. Jatkamalla iteraatioprosessia saadaan lopulta ΔT jokaiselle kerrokselle halutulla tarkkuudella (Campbell, 1985).

3.3. Energiatasapaino sillalla

Ilmatieteen laitoksen tiesäämalli laskee lämpötasapainon aina kiinteälle maaperälle, eikä se ota siltoja huomioon. Oleellisin ero sillan yläpinnan lämpötasapainossa kiinteään maaperään verrattuna on se, että lämmön vuo maahan on erilainen. Sillan alapinnalle tulee laskea oma energiatasapaino ja sillan paksuudesta riippuu kuinka vahvasti se vaikuttaa yläpinnan lämpötilaan. Alapinnan energiatasapainoa voidaan kyllä kuvata yhtälöllä 10, eli siinä on mukana lämmön vuo siltaan, kokonaissäteily, havaittavan lämmön vuo ja latentin lämmön vuo, mutta säteilytermi lasketaan eri tavalla kuin yläpinnalle.

Sillan alapinta ei saa lainkaan suoraa säteilyä, vaan suunnilleen kaikki sen saama säteily on sillan alla olevan pinnan heijastuksista ja sen emittoimasta pitkäaaltoisesta säteilystä. Sillan pohja säteilee ulos lämpösäteilyä kuten yläpintakin. Pohjan saaman säteilyn määrää on hankala laskea, sillä heijastukset voivat olla moninkertaisia, eli säteily voi heijastua ensin vedestä siltaan, sitten sillasta takaisin veteen ja taas siltaan ja niin edelleen. Asiaa voi kuitenkin approksimoida olettamalla, että kaikki säteily on heijastunut pinnasta vain kerran eli sillasta heijastunut säteily ei enää palaa takaisin. Havaittavan ja latentin lämmönvuohon vaikuttavat sillan alapuolen tuuliolot.

On kuitenkin olemassa myös tiesäämalleja, jotka ottavat sillan erilaisen lämpötasapainon huomioon. METRo:ssa (Model of the Environment and Temperature of Roads) (Crevier ja Delage, 2001) hilaväli on erilainen sillalle kuin tavalliselle maalle ja se olettaa sillan pohjan lämpötilaksi ilman lämpötilan. Sillalla alapinnan lämpötila siis muuttuu mallissa toisin kuin tavallisella tiellä (Crevier ja Delage, 2001). Sillan lämpötilan laskemiseksi on myös kehitetty oma moduuli, joka voidaan liittää muihin tiesäämalleihin. Tämä BridgeT niminen malli saa sääsuureet lähtötilakseen varsinaiselta säämallilta ja laskee niiden perusteella sillan lämpötasapainon (Greenfield ja Takle, 2006). BridgeT ei oleta sillan pohjan lämpötilaa vakioksi toisin kuin METRo, vaan siihen vaikuttaa turbulenttinen lämmönvuo ja lämmön johtuminen. BridgeT:n sillan ominaisuuksia, kuten paksuutta, lämmönjohtavuutta ja absorptiokykyä voi muuttaa tilanteen mukaan. Malli laskee sillan kannen lämpötilan, jään syvyyden ja sillan kunnon. Sekä METRo:ssa että BridgeT:ssä lämpötilan johtuminen lasketaan yksiulotteisen diffuusiyyhtälön avulla, joka on samantapainen kuin yhtälö 13. Sillan lisääminen myös Ilmatieteen laitoksen tiesäämalliin on teoriassa mahdollista, jos laskentasyvyys ja alapinnan pakotetta vaihdetaan.

4. ENNUSTE- JA HAVAINTOAINEISTOT

4.1 HARMONIE

HARMONIE (Hirlam Aladin Research on Meso-scale Operational NWP in Europe) on numeerinen sääennustusmalli. Se on useiden eurooppalaisten sääpalveluiden yhteisen projektin HIRLAM:n tuotosta. HIRLAM-projekti aloitettiin 1985 ja se jatkuu edelleen aktiivisena. Säämalli tuottaa tiesäämallille sääennusteet, joita tiesäämalli käyttää lähtötietona. Ilmatieteen laitoksen HARMONIE kattaa Suomen alueen. HARMONIE:ssa hilaväli on 2,5 km, joten se siis kykenee ennustamaan mesoskaalan ilmiöitä tarkemmin kuin suurempihilaiset mallit, kuten HIRLAM. HARMONIE:ssa on myös pienempi aika-askel kuin HIRLAM:ssa, sillä HIRLAM:in aika-askel on 240s ja HARMONIE:n 60 s.

HARMONIE:n dynamiikka perustuu malliyhtälöiden ratkaisuun semi-implisiittisellä semi-Lagrangialaisella menetelmällä (www.hirlam.org). Termi ”semi-Lagrangialainen” viittaa siihen, että advektio lasketaan määrittämällä tuulivektorin avulla, missä kyseinen ilmapaketti oli edellisellä aika-askeleella ja tuomalla tämä ilmapaketti laskentapisteeseen. Mallissa käytetään Euler-yhtälöryhmää, joka on ei-hydrostaattisen ja sallii kokoonpuristuvuuden pystysuunnassa. Lähtötilan laskeminen hoidetaan Ilmatieteen laitoksen HARMONIE:ssa 3D-VAR menetelmällä. Menetelmä perustuvat sakkofunktion minimointiin, joka kuvaa lähtötila-analyysin neliöllistä poikkeamaa kaikista käytettävissä olevista havainnoista sekä jo tehdystä muutaman tunnin ennusteesta. Tavoitteena on saada lähtötila, joka sopii sekä ennusteeseen että havaintoihin mahdollisimman hyvin. 3-D VAR -menetelmän eräs ongelma on, että se olettaa kaikki havainnot samanaikaisiksi. 4-D VAR menetelmässä tämä on korjattu ottamalla huomioon havaintojen ajankohdat. HARMONIE-malli perustuu METEO-FRANCE:n AROME-säämalliin (Seity ym. 2011). HARMONIE:ssa on sama epähydrostaattinen dynamiikka kuin AROME:ssa, ja siinä on myös osittain muut samat fysikaaliset yhtälöt.

Tässä tutkimuksessa käytettiin HARMONIE:n antamaa ennustetietoa interpoloituna haluttuihin pisteisiin. Kunkin ennusteen analyysi oli ajalta 00 UTC ja ennuste oli 24 tunnin mittainen. Aineisto otettiin tiesäämallille alimmalta mallipinnalta. Pinnan lämpötilan lähtötilanteeksi otettiin mallin alimman pinnan ilman lämpötilan arvo analyysihetkeltä.

4.2 Tiesääasemat

Suomessa on noin 500 tiesääasemaa (Saarikivi 2012). Niiden sijainnit on esitetty kartalla liitteessä A. Ne sijaitsevat tyypillisesti isompien teiden varsilla kiinnitettynä pylvääseen. Eniten asemia on eteläisessä Suomessa ja rannikkoseudulla, missä on eniten liikennettä ja

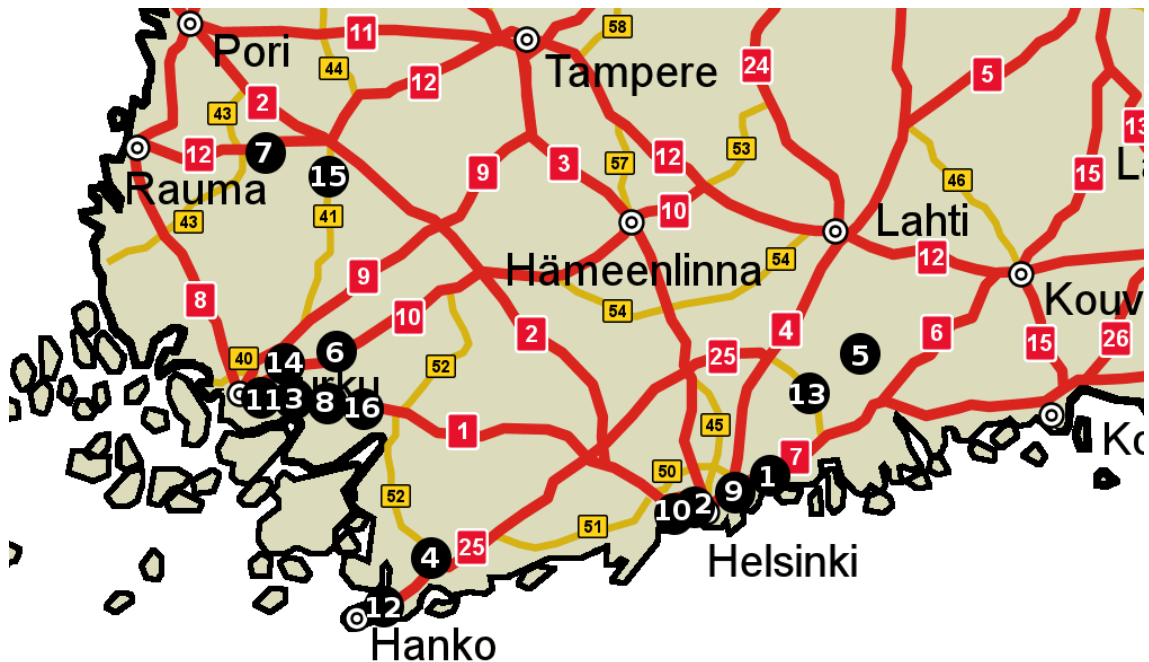
säävaihteluista. Iso osa niistä ei ole meteorologisen edustavuuden kannalta kovinkaan otollisella paikalla, vaan niitä on sijoitettu helposti jäätyviin ja kylmiin paikkoihin (Saarikivi ym., 2007). Suomen tiesääasemat ovat Vaisalan Oyj:n valmistamia Rosa-asemia. Jokainen asema mittaa ilman ja tienpinnan lämpötilaa, tuulen voimakkuutta ja suuntaa sekä tienpinnan kosteutta (Hippi, 2004). Suunnilleen kaikissa asemissa on lisäksi Vaisalan DRS511 anturit, jotka kykenevät mittaamaan tienpinnan kuntoa, kuten jäätä, lunta ja kosteutta (Vaisala, 2001). Myös Vaisalan DSC111 sensoreita on käytössä (Vaisala, 2010). Ne kykenevät mittaamaan tien pinnalla olevan jään, veden ja lumen määrää ja määrittämään kitkan. Ne voivat havaita tienpinnalla olevat jääkiteet jo ennen kuin ne edes aiheuttavat liukkaita. Tiesääasemat tekevät mittauksia ja lähettävät tietoja 10-15 minuutin välein.

Tässä tutkimuksessa tehtiin tiesääsimulaatioita käyttäen ennustetietoa, joka oli interpoloitu HARMONIE:n tekemästä ennusteesta eri tiesääasemien koordinaatteihin. Nämä tiesääasemat ja niiden koordinaattipisteet on esitetty taulukossa 4.1. Kuvassa 4.1 on pisteet kuvattu karttaan. Asemia pyrittiin valitsemaan siten, että mukaan saadaan sekä silloilla että mäessä olevia asemia. Mukaan otettiin myös niiden lähistöllä olevia muita asemia vertailuasemiksi. Asemista Sipoonlahden, Lapinlahden ja Piikkiön asemat sijaitsevat silloilla. Sipoonlahden silta ylittää 300

Tiesääasema	Leveyspiiri (⁰ N)	Pituuspiiri (⁰ E)	Sijainti ja tien ympäristö
1. Sipoonlahti	60.281383	25.325345	Sillalla metsän rajassa
2. Lapinlahti	60.166123	24.890894	Sillalla avoimella paikalla
3. Piikkiö	60.445831	22.534802	Sillalla avoimella paikalla
4. Tammisaari	59.981471	23.402767	Mäessä, ympärillä metsää
5. Hallila	60.621403	25.86276	Mäessä, muutamia puita
6. Yliskulma	60.541749	22.61947	Mäessä, peltoa ympärillä, lähellä metsän rajaa
7. Eura	61.137655	22.178252	Mäessä, ympärillä metsää
8. Paimio	60.423704	22.683001	Mäessä, pohjoisessa kalliioleikkaus ja etelässä metsää.
9. Jakomäki	60.251586	25.064503	Tasaisella maalla, ympärillä metsikköä
10. Vaskisalmi	60.164078	24.852451	Tasaisella maalla, muutamia puita
11. Kaarina	60.424022	22.402316	Tasaisella maalla avoimella paikalla
12. Hanko	59.856418	23.021907	Tasaisella maalla, ympärillä metsää
13. Monninkylä	60.505162	25.538249	Lähes tasaisella maalla puiden vieressä
14. Lieto	60.497610	22.426060	Tasaisella maalla, eteläpuolella metsää
15. Jokisivu	61.110268	22.652998	Tasaisella maalla avoimella paikalla
16. Pitkäporras	60.428354	22.840220	Tasaisella maalla melko avoimella paikalla

Taulukko 4.1. Tutkitut tiesääasemat, niiden sijainnit ja ympäristökuvaukset.

m leveän ja 3 m syvän lahden, kun taas Lapinlahden silta ylittää Lauttasaaren salmen ja sen pituus on noin 600 (Suomen rakennusinsinöörien liitto, 2004). Piikkiön asema sijaitsee Hepojokilaakson sillalla, jonka alla ei ole varsinaista vesialuetta. Sen pituus on noin 400 metriä (Tiehallinto, 2003).



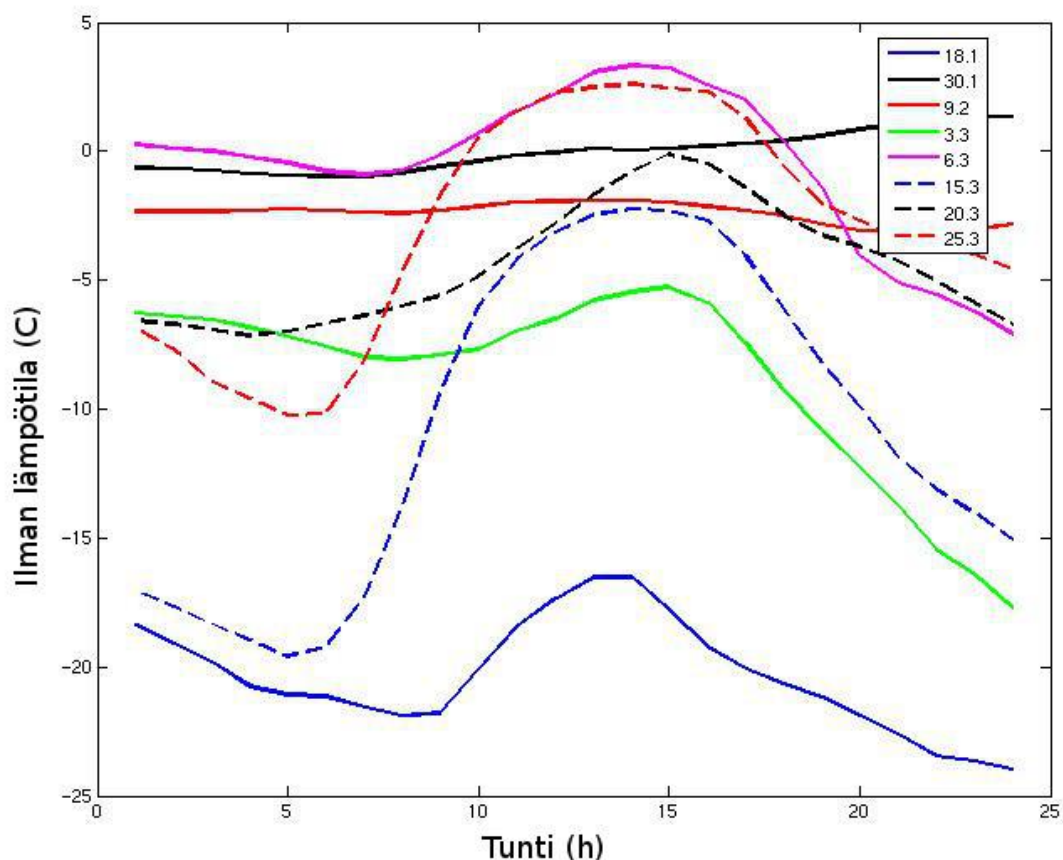
Kuva 4.1. Tutkimuksessa käytettyjen tiesääasemien sijainnit. Numerointi on taulukon 4.1 mukainen.

Mäessä sijaitsevat Tammisaaren, Hallilan, Yliskulman, Euran ja Paimion tiesääasemat. Hallilan asema on etelään päin kaltevassa rinteessä, Euran ja Tammisaaren asemat ovat lounaaseen kaltevassa rinteessä ja Yliskulman ja Paimion asemat länteen päin kaltevassa rinteessä. Tammisaaren, Hallilan, Yliskulman ja Euran mäen kaltevuuksiksi arvioitiin noin 1° ja Paimion mäen kaltevuudeksi noin 2° TWCC:n (The World Coordinate Converter) ja Googlen karttapalveluiden perusteella. Loput asemat on valittu siten, että saataisiin yksi tasaisella maalla sijaitseva asema kunkin tiellä tai rinteessä sijaitsevan aseman lähistöltä.

4.3 Tutkittavat päivät

Tutkimukseen pyrittiin valitsemaan päiviä, joiden säätilat poikkeavat toisistaan. Valitut päivät olivat 18.1., 30.1., 9.2., 3.3., 6.3., 15.3., 20.3. ja 25.3.2013. Kuvassa 4.2 on esitetty kunkin päivän keskiarvot asemien lämpötiloista. Kuvassa on käytetty keskiarvoja, jotta paikalliset erot eivät näkyisi merkitsevästi vaan kuvasta saataisiin kaikkia asemia yhteisesti kuvaava lämpötilakäyrä. Maaliskuu 2013 oli Etelä-Suomessa poikkeuksellisen kylmä ja silloin

esiintyi pakkasia ja liukkautta. Tutkituista päivistä kylmin oli 18.1., jolloin asemien keskimääräinen lämpötila pysyi alle -15°C . Sademäärä oli kyseisenä päivänä alhainen. 30.1. ilman lämpötila pysytteli koko päivän nollan tuntumassa ja sademäärä oli runsas. Sadetta tuli sekä lumena, vetenä että räntänä. 9.2. asemien keskimääräinen lämpötila oli tasaisesti muutaman asteen nollan alapuolella. Lunta satoi jonkin verran. 3.3. satoi myös lunta ja lämpötila oli aamuyöllä ja päivällä reilu viisi astetta pakkasen puolella, mutta illalla lämpötila laski merkittävästi. 6.3. oli poutainen ja aamuyöllä lämpötila oli nollan tuntumassa. Päivällä lämpötila kohosi nollan yläpuolelle ja laski illalla alle -5°C . Lämpötilavaihtelut olivat erityisen suuria 15.3., jolloin yöllä lämpötila oli alle -15°C mutta kohosi päivällä vain muutamaan pakkasasteeseen. Kyseinen päivä oli yleisesti selkeä ja aurinkoinen. 20.3. oli myös poutainen ja lämpötila oli pakkasen puolella, mutta kovia pakkasia ei ollut yölläkään. 25.3 satoi jonkin verran ja päivällä lämpötila oli yli nollan, mutta yöllä se oli jopa -10°C .



Kuva 4.2. Keskiarvo 16 eri tiesääaseman kahden metrin lämpötilan vuorokausisyyklistä.

5. MENETELMÄT JA TULOKSET

5.1 Tienpintalämpötilan osuvuus eri asemilla

5.1.1 Menetelmät

Osa tähän tutkimukseen otetuista tiesääasemista sijaitsee mäessä, osa sillalla ja osa tasaisella maalla. Mallia ajettiin HARMONIEN tuottamalla sääennusteella taulukossa 4.1 olevien tiesääasemien pisteisiin, jotta saataisiin selville, onko tiesäämallin tienpinnan lämpötilaennusteen laadussa eroa eri asemien kesken. Vertailuun otettiin mukaan päivät 25.1. - 25.3.2013. Kunkin ennusteen pituus oli yksi vuorokausi ja ennusteen tekohetki 00 UTC. Näitä ennusteita verrattiin asemilla tehtyihin havaintoihin. Ensisijaisena tavoitteena on selvittää, ovatko ennusteet epätarkempia sillalla tai mäessä sijaitsevalla asemalla kuin tasaisella maalla sijaitsevalla asemalla. Kutakin sillan tai mäen ennustetta verrattiin läheisen tasaisella maalla sijaitsevan aseman ennusteen kanssa. Asemaparit ja niiden väliset etäisyydet ovat taulukossa 5.1.

Mäessä/Sillalla sijaitseva asema	Vertailuasema	Asemien välinen etäisyys
1. Sipoonlahti	9. Jakomäki	9,2 km
2. Lapinlahti	10. Vaskisalmi	1,4 km
3. Piikkiö	11. Kaarina	4,7 km
4. Tammisaari	12. Hanko	15,9 km
5. Hallila	13. Monninkylä	13,7 km
6. Yliskulma	14. Lieto	7,3 km
7. Eura	15. Jokisivu	16,0 km
8. Paimio	16. Pitkäporras	5,3 km

Taulukko 5.1. Vertailtavat asemat ja niiden väliset etäisyydet. Asemien nimen edessä olevat luvut viittaavat taulukon 4.1 lukuihin ja ne ovat samat kuin kuvassa 4.1.

Havainnot, toisin kuin ennusteet, eivät ole tasatunneittain. Tasatunnin ennustetta vastaavana havaintotietona käytettiin kyseisen tunnin ensimmäistä mittausta. Tutkimukseen otettiin mukaan vain ne tunnit, joilta oli havainto tienpinnan lämpötilasta tunnin ensimmäisen puoliskon aikana. Kullekin päivälle ja asemalle laskettiin erikseen mittausten ja ennusteen välinen RMSE (root mean square error), joka lasketaan käyttäen kaavaa

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{h,i} - T_{e,i})^2}{n}}, \quad (14)$$

missä T_h on havaittu tienpinnan lämpötila, T_e on ennustettu tienpinnan lämpötila ja n on ennustepisteiden lukumäärä. Mitä pienempi RMSE on, sitä lähempänä ennustetut ja havaitut arvot ovat toisiaan.

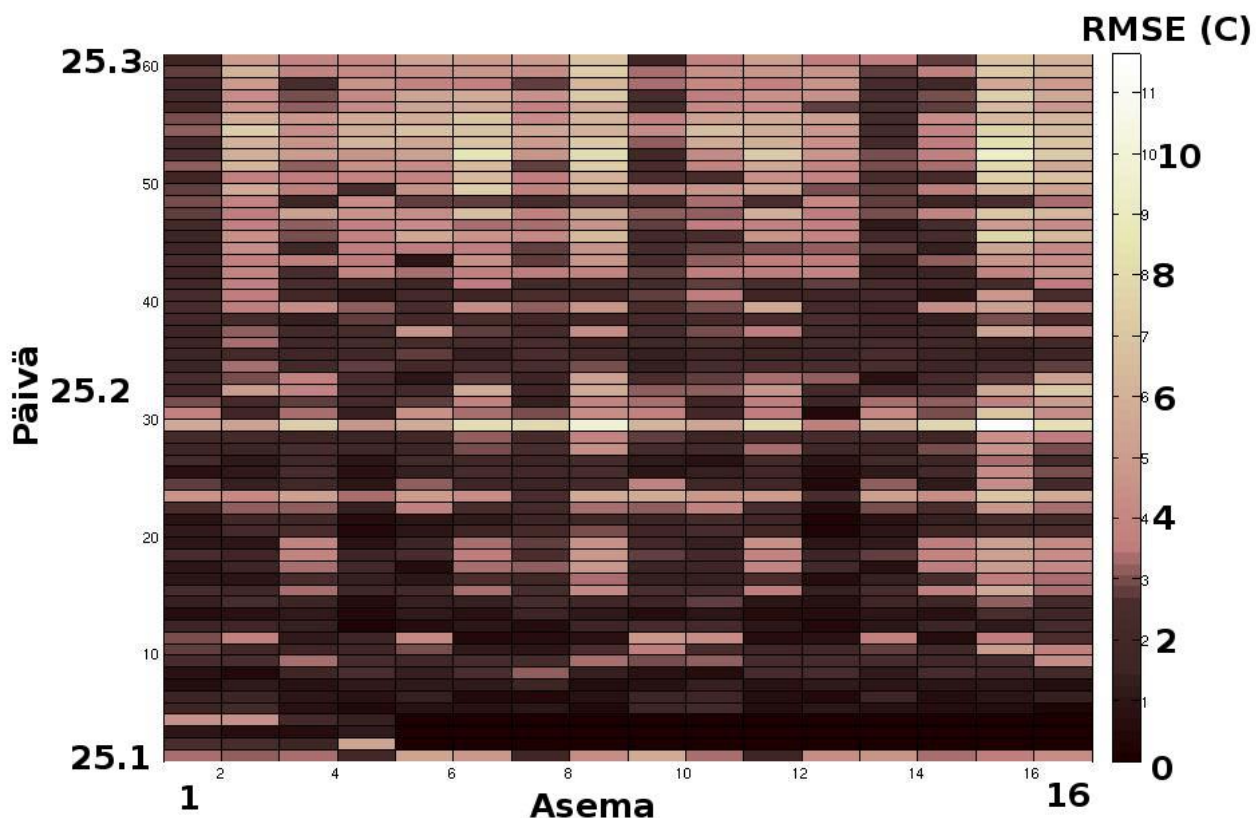
Eri asemien vertailu tällä tavalla ei kuitenkaan välttämättä kerro, ovatko tasaisen maan lämpötilaennusteet laadukkaampia kuin mäen tai sillan. Tienpinnan lämpötilaan vaikuttaa paljon muitakin tekijöitä, kuten varjostukset ja tienpinnan albedo. Vertailtavat asemat sijaitsevat yleensä niin etäällä toisistaan, etteivät paikalliset olosuhteet ole riittävään samankaltaisia pelkästään mäen tai sillan vaikutuksen tutkimiseen. Vertailtavien asemien välimatka vaihteli välillä 1-16 km. Lisäksi HARMONIE:n antama ennustus on erilainen eri pisteille. Tässä ennustetut lämpötilat voivat olla kauempana todellisista lämpötiloista kuin operatiivisessa tiesääennusteessa, sillä operatiivisilla ennusteilla on parempi lähtötila. Operatiivisessa ennusteessa lähtötila on nimittäin saatu ajamalla tiesäämallia ensin kaksi päivää havainnoilla (Kangas ym., 2012), kun taas tässä lähtötilana toimii ensimmäinen ennuste.

5.1.2 Tulokset

Kuvassa 5.1 on esitetty eri päiville ja asemille tehtyjen pintalämpötilaennusteiden ja havaittujen pintalämpötilojen väliset RMSE-arvot. RMSE näyttäisi vaihtelevan paljon päivästä ja asemasta riippuen. Noin 31 % arvoista on pienempiä kuin 2 °C ja 25 % on suurempia kuin 4 °C. 44 % arvoista osuu tähän väliin. Havaintojen puuttumisesta johtuen 25.1-28.1 kuvassa on 36 nolla-arvoa, joita ei kuitenkaan laskettu prosenttimääriin mukaan.

Ennusteiden laatu näyttösi heikkenevän sitä mukaa, mitä lähemmäs kevättä tullaan. Tämä todennäköisesti johtuu siitä, että auringon säteily lisääntyy ja nostaa tienpinnan lämpötilaa. Koska tiesäämalli on tarkimmillaan kun lämpötila on lähellä nollaa ja sillä on taipumus ennustaa liian pieniä lämpötiloja lämpimissä olosuhteissa, kevään edetessä ennusteen laatu huononee. Poikkeuksen muodostavat Sipoonlahden (1) ja Monninkylän (13) asemat, joiden ennusteiden taso ei laske alkukeväälläkään. Tämä johtuu siitä, että ne sijaitsevat muita asemia viileämmällä paikalla eikä tiesäämallin taipumus ennustaa liian matalia lämpötiloja vaikuta yhtä paljon kuin lämpimissä paikoissa sijaitsevilla asemilla. Monninkylän asema on lähes metsän rajassa, kun taas muilla metsässä sijaitsevilla asemilla tien ja metsän reunan välillä on reilun levyinen pientare. Sipoonlahden asema sijaitsee myös melko varjoisella paikalla ja lisäksi siellä on huomattavan tuulista. Kaarinan (11), Jokisivun (15) ja Pitkäportaan (16) asemille RMSE-arvot ovat puolestaan poikkeuksellisen huonoja. Nämä asemat sijaitsevat avoimella paikalla, mikä saattaa tehdä ne muita asemia lämpimämmiksi. Paimionkin asemalle (8) RMSE arvot ovat korkeita, mutta selitystä ei löydy sen sijaintipaikan perusteella. Havaintojen perusteella se ei näytä olevan sen lämpimämpi kuin esimerkiksi Piikkiönkään asema. Syyn löytämiseksi pitäisi tehdä asemia vertailevaa lisätutkimusta.

Päivät 22.2 ja 16.2 erottuvat kuvasta 5.1 poikkeuksellisen korkeina RMSE-arvoilla jokaiselle asemalle. Ennusteen ja havaintojen vertailun perusteella tämä johtunee siitä, että ennustetut lämpötilat ovat poikkeuksellisen pieniä verrattuna havaittuihin lämpötiloihin erityisesti yöaikaan. Tämä poikkeavuus on todennäköisesti peräisin jo HARMONIE:n antamasta ennusteesta. Mitään systemaattista eroa sillalla tai mäellä ja tasaisella maalla sijaitsevien asemien RMSE-arvoilla ei kuvan perusteella ole.

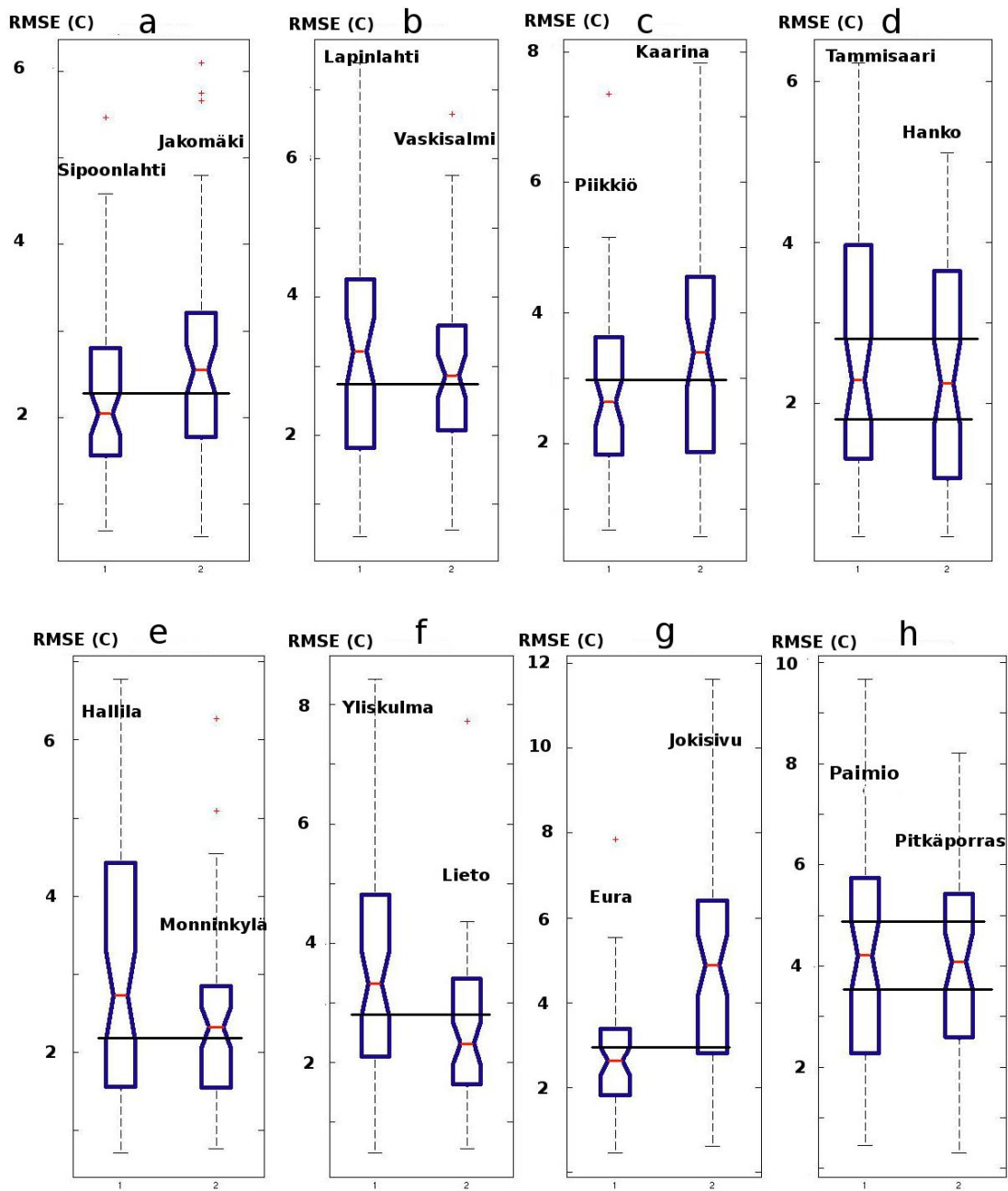


Kuva 5.1. Havaittujen pintalämpötilojen ja eri päville ja asemille ennustettujen pintalämpötilojen väliset RMSE-arvot ($^{\circ}\text{C}$). Kukin ruutu kuvaa yhden vuorokauden keskiarvoa kyseiseltä asemalta. Päivät ovat kuvassa riveittäin siten että alin rivi vastaa päivää 25.1.2013 ja ylin päivää 25.3.2013. Kukin sarake taas kuvaa yhtä asemaa. Asemien numerointi on sama kuin taulukossa 4.1.

Kuva 5.2 kuvaa eri asemaparien RMSE-arvojen tilastollista jakaumaa. Kullekin asemalle on oma laatikko, johon on kerätty eri päville saadut RMSE-arvot. Laatikon keskiviiva tarkoittaa kuvassa RMSE-joukon mediaania, alempi reuna 25 % ja ylempi 75 % luottamusväliä. Luottamusvälillä tässä tarkoitetaan, millä todennäköisyydellä RMSE on tämän rajan alapuolella. Laatikoiden keskellä olevat väkäset kuvaavat sitä aluetta, joiden sisälle joukon mediaani osuu 95 % varmuudella. Kahden joukon eron voidaan sanoa olevan tilastollisesti merkittävä, jos

kahden väkäsien väliin jäävät alueet eri joukoilla eivät leikkaa toisiaan. Mustat katkoviivat kuvaavat joukon äärimmäisiä arvoja. Punaisella tähdellä merkatut arvot ovat jo niin kaukana pääjoukosta, että ne voi tulkita joukkoon kuulumattomiksi. Kuten kuvasta 5.1 myös tästä kuvasta nähdään Piikkiön, Pitkäportaan ja Jokisivun RMSE –arvojen olevan erityisen korkeita, sillä ne ovat yli 4 °C. Myös Monninkylän ja Sipoonlahden asemat erottuvat poikkeuksellisen pienillä RMSE-arvoilla.

Vain Yliskulman ja Liedon asemien sekä Euran ja Jokisivun asemien RMSE-arvot näyttäisivät eroavan toisistaan tilastollisesti merkittävästi, mutta Yliskulman ja Liedon asemien ero on niin pieni, että se voi aiheutua myös havaintojoukon pienuudesta. Euran ja Jokisivun asemille laskettujen RMSE-arvojen ero on huomattavan suuri, sillä Euran aseman mediaani on 2,6 °C ja Jokisivun 4,9 °C. Kuudella asemaparilla RMSE-arvojen mediaanit ovat kuitenkin niin lähellä toisiaan, ettei ennusteiden välille voi tehdä eroa. Vertailuasemien ja sillalla tai mäellä sijaitsevien asemien hajonnoissakaan ei ole mitään systemaattista eroa. Näiden tulosten perusteella näyttäisi siltä, että tiesäämalli ei anna sen tarkempia ennusteita tienpinnan lämpötilasta sillalle tai mäelle kuin tasaiselle maallekaan. Tämä saattaa kuitenkin johtua myös HARMONIE:n antaman ennusteen virheistä. Aseman sijainnin mäessä tai sillalla aiheuttamat virheet ovat todennäköisesti niin pieniä, että ne peittyvät muiden virheiden alle. Esimerkiksi aseman lämpimyydellä näyttäisi olevan huomattavasti enemmän merkitystä. HARMONIE:n hilaväli on niin iso, ettei sillä voida olettaakaan saatavan tarkkoja ennusteita tiesääasemien pisteisiin. Aseman sijainnin aiheuttamien virheiden selvittämiseksi tarvittaisiin erittäin tarkkaa paikallista ennustetta. Toinen vaihtoehto olisi ajaa tiesäämallia synop-havainnoilla ja verrata saatuja tienpintalämpötiloja tiesääasemien havaintoihin.



Kuva 5.2. Kuvat a-h kuvaavat asemaparien havaintojen ja ennusteiden välisen RMSE:n tilastollista jakaumaa. Asemaparit ovat samassa järjestyksessä kuin taulukossa 5.1. Kussakin kuvassa on vasemmalla mäessä tai sillalla sijaitseva asema ja oikealla sen lähellä sijaitseva vertailuasema. Laatikon keskellä oleva viiva tarkoittaa mediaania, sen ylä- ja alarajat 75 % ja 25 % prosentin luottamusväliä ja väkäset kuvaavat aluetta, jolle joukon mediaani osuu 95 % varmuudella. Mustat viivat on piirretty helpottamaan asemaparin väkästen väliin jäävän alueen leikkaamisen havaitsemista.

5.2 Albedo

5.2.1 Menetelmät

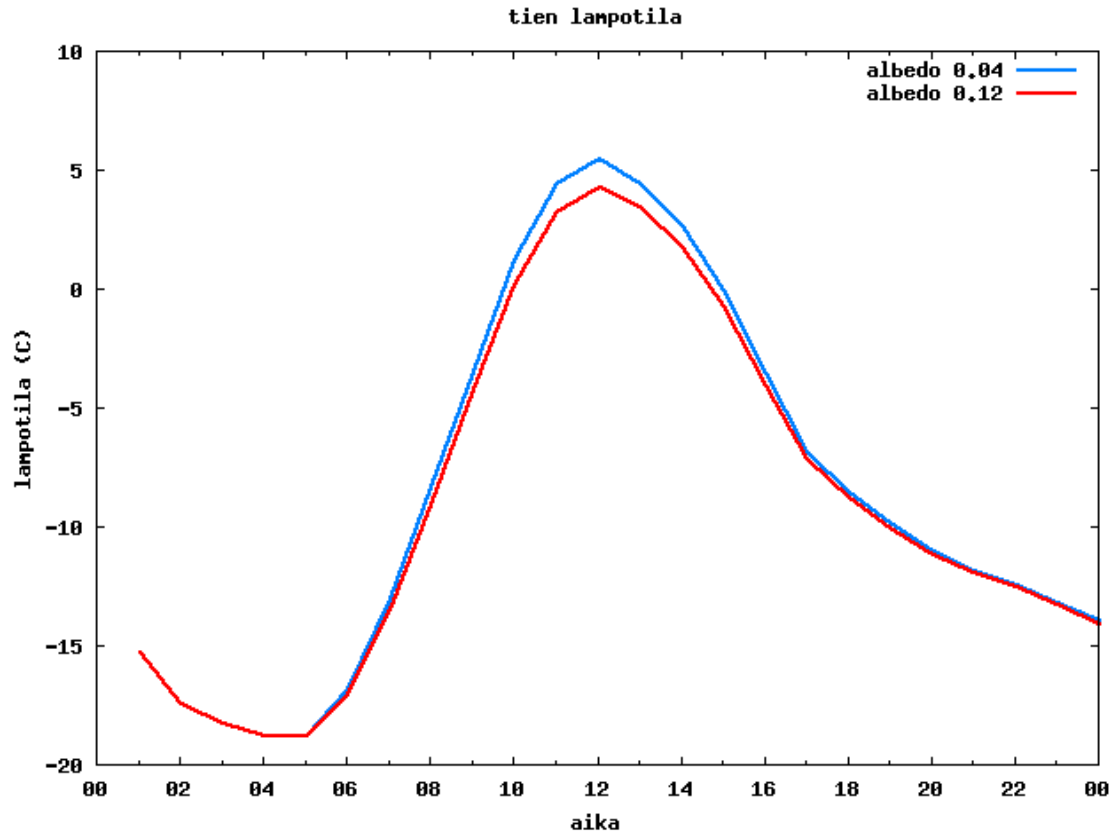
Tiesäämallin herkkyyttä tienpinnan albedolle tutkittiin ajamalla malli eri päiville ja asemille albedoilla 0.04 ja 0.12. Pienempi albedo vastaa juuri valmistuneen pikimustan asfaltin albedoa, kun taas suurempi kuvaa jo paljon kulunutta ja harmaaksi käynyttä asfalttia. Malli ottaa huomioon myös lumen ja sen albedon lumisella tienpinnalla. Jäisellä tienpinnalla malli huomioi jääkerroksen paksuuden ja pienentää albedoa kerroksen paksuuntuessa. Tutkitut päivät olivat 18.1., 30.1., 9.2., 3.3., 6.3., 15.3. ja 20.3.2013. Saaduista ennusteista laskettiin eri tienpinnan albedoilla tehtyjen ajojen pintalämpötilojen absoluuttiset erotukset. Mukaan otettiin ajoille klo 10.00 – 14.00 tehdyt ennusteet kaikille asemille.

5.2.2 Tulokset

Päivämäärä	$T(\alpha=0,04)-T(\alpha=0,12)$ (K)
18.1.2013	0,28
30.1.2013	0,02
9.2.2013	0,24
3.3.2013	0,34
6.3.2013	0,44
15.3.2013	1,13
20.3.2013	0,58

Taulukko 5.2. Albedoilla 0,04 ja 0,12 tehtyjen ajojen pintalämpötilan päivääjan erotusten keskiarvot eri päivinä. Mukana on 16 asemaa.

Eri albedoilla tehtyjen ajojen pintalämpötilojen erotusten keskiarvo kaikille tiesääasemille on esitetty taulukossa 5.2. Mukaan on otettu vain välille klo 10-14 simuloidut arvot. Yleisesti pienemmällä albedolla saatiin suuremmat pintalämpötilat, mikä on loogista, sillä mustemmat pinnat absorptoivat enemmän auringon säteilyä. 15.3. eroa oli jopa yli asteen verran. Ero riippuu kuitenkin saatavan säteilyn määrästä. Myöhemmin maaliskuulla on saatavana enemmän auringon säteilyä kuin helmikuussa, jolloin eri albedoilla tehtyjen ajojen erotuksetkin ovat isommat. Eroon vaikuttaa myös tienpinnan tila. Lumipeitteisellä tiellä asfaltin albedo ei vaikututa vaan pinnan albedona käytetään lumen albedoa. Sen sijaan jäisellä, märällä ja paljaalla tiellä asfaltin albedolla on mallissa merkitystä. Päivien väliseen vaihteluun vaikuttaa myös pilvisyys. Kuvassa 5.4 on esimerkki tienpinnan lämpötilasyklistä eri albedoilla 15.3.2013 Kaarinan tiesääasemalta. Pienemmän albedon pinnan lämpötila lähtee auringon noustua hiljalleen kohoamaan korkeemmaksi kuin suuremman albedon pinnan, ja keskipäivällä ero on jo noin asteen verran. Auringon laskettuakin mustempi pinta jää hieman vaaleampaa lämpimämmäksi.



Kuva 5.4. Ennustettu tienpinnan lämpötila Kaarinan tiesääasemalla 15.3.2013 tiesäämallin ajoilla, kun tien albedona käytettiin arvoja 0.04 (sininen viiva) ja 0.12 (punainen viiva).

5.3 Päällysteen paksuus

5.3.1 Menetelmät

Tiesäämallissa pintarakenteen paksuutena käytetään oletusasetuksena talvella arvoa 3 cm. Pintarakenteen paksuuden vaikutusta tienpinnan lämpötilaan simuloitiin muuttamalla päällystekerroksen paksuutta mallissa. Pintakerrosten ominaislämpönä käytettiin arvoa $1,94 \cdot 10^6 \text{ J/(m}^3\text{K)}$ ja tiheytenä arvoa $2,11 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Nämä ovat tiesäämallin oletusarvoja. Päällystekerroksen paksuutta vaihdeltiin välillä 2-21 cm ja tiesäämalli ajettiin kullekin paksuudelle 16 eri pisteessä kuutena eri päivinä. Päivät olivat 18.1., 30.1., 9.2., 3.3., 6.3. ja 15.3.2013 ja ne oli valittu siten että saataisiin tutkittua päällysteen paksuuden vaikutusta erilaisilla säätyypeillä. Kustakin ajosta laskettiin päivän suurimman ja pienimmän lämpötilan erotus. Näistä erotuksista laskettiin 16 aseman keskiarvo kullekin paksuudelle.

5.3.2 Tulokset

Eri paksuisille päällysteille tehtyjen ajojen pintalämpötiloista lasketut pienimmän ja suurimman lämpötilan erotukset ovat taulukossa 5.3. Pienimmän ja suurimman lämpötilan

erotus vaihteli melko paljon päivästä riippuen. Suurin vaikuttava tekijä vaihteluun oli säteilyn määrä. Neljän senttimetrin paksuiselle päällysteelle erotus oli 30. tammikuuta 2,8 °C, kun taas 15. maaliskuuta se oli 21,4 °C. Päällysteen paksuuden lisääminen pienensi lämpötilavaihtelua vuorokauden aikana jonkin verran, mutta muutaman sentin paksuusvaihtelulla ei ole kovin paljoa merkitystä muutoin kuin lämpötilavaihtelun ollessa suurta. Malliajoissa pinnan lämpötilan pienimmän ja suurimman arvon erotuksen suuruuden muutos oli eri päivinä yhdestä viiteen astetta, kun päällysteen paksuus vaihtui kahdesta kahteenkymmeneen senttimetriin. Pilvisinä päivinä päällysteen paksuudella ei näyttäisi olevan juurikaan merkitystä, mutta aurinkoisina päivinä jo jonkin verran. Päällysteen paksuuden lisääminen vaikuttaa mallissa myös alimman kerroksen syvyyteen, sillä sen alapinnan korkeus laskee enemmän kuin päällysteen. Käytännössä tällä ei ole kuitenkaan merkitystä, koska lämpötilanvaihtelut ovat syvällä maassa hitaita.

Syvyys (cm)	18.tammi	30.tammi	9.helmi	3.maalis	6.maalis	15.maalis
2	6,8	3,0	5,3	12,3	12,2	22,2
3	6,7	2,9	5,1	12,1	11,8	21,9
4	6,6	2,8	4,9	11,9	11,5	21,4
5	6,4	2,6	4,7	11,5	11,1	20,8
6	6,2	2,5	4,5	11,2	10,7	20,2
7	6,1	2,4	4,3	10,9	10,3	19,6
8	6,1	2,3	4,2	10,5	9,9	19,1
9	6,0	2,3	4,1	10,3	9,6	18,8
10	5,9	2,2	4,0	10,0	9,3	18,4
11	5,9	2,1	3,9	9,8	9,1	18,2
12	5,9	2,1	3,9	9,7	9,0	18,0
13	5,9	2,1	3,8	9,6	8,9	17,8
14	5,8	2,0	3,8	9,5	8,7	17,7
15	5,8	2,0	3,8	9,5	8,7	17,6
16	5,8	1,9	3,8	9,4	8,6	17,6
17	5,8	1,9	3,7	9,4	8,6	17,5
18	5,8	1,9	3,7	9,4	8,5	17,4
19	5,8	1,9	3,7	9,4	8,5	17,4
20	5,8	1,8	3,7	9,4	8,5	17,4
21	5,7	1,8	3,7	9,4	8,5	17,3

Taulukko 5.3. Päällysteen paksuuden vaikutus tienpinnan lämpötilaan. Ensimmäisessä sarakkeessa on päällysteen paksuus ja lopuissa sarakkeissa on esitetty 16 eri paikan suurimman ja pienimmän lämpötilan erotuksen keskiarvo eri päiville vuonna 2013 (°C).

5.4 Kaltevuus

5.4.1 Menetelmät

Ilmatieteen laitoksen tiesäämalli ei ota kaltevuutta huomioon, vaan olettaa tien tasaiseksi. Mallille annetaan lähtöparametriksi tasaista pintaa vastaan kohtisuora säteily, joka on laskettu numeerisella säämallilla. Tienpinnan lämpötilaa kaltevalla alustalla simuloitaessa otettiin huomioon kolme tekijää, jotka olivat tulevan lyhytaaltosäteilyn muutos, tulevan pitkäaaltosäteilyn muutos ja lähtevän pitkäaaltosäteilyn muutos. Näiden tekijöiden vaikutusta tienpinnan lämpötiloihin tutkittiin käyttämällä HARMONIEN tuottamaa sääennustetta päiville 15.-17.03.2013 Kaarinan tiesääaseman koordinaatteihin. Kyseiset päivät olivat niin pilvettömiä, että hajasäteilyn arvioitiin olevan paljon suoraa säteilyä pienempää.

Lyhytaaltoisen säteilyn muutos kaltevalla alustalla otettiin huomioon kertomalla tuleva lyhytaaltainen säteily kaltevuuskertoimella, joka laskettiin yhtälön 7 avulla. Testissä käytettiin etelärinnettä, jonka kaltevuus oli 10^0 . Tämä muutettu lyhytaaltosäteilyennuste annettiin tiesäämallille alkuperäisen säteilyennusteen sijasta. Lyhytaaltoisen säteilyn arvioitiin olevan vain suoraa auringon säteilyä ja hajasäteily jätettiin huomiotta.

Tulevan pitkäaaltosäteilyn muutosta simuloitiin avonaisuuskertoimen avulla. Kaltevalla tasolla osa taivaasta jää rinteen taakse, mikä pienentää saapuvaan säteilyn määrää. Yhtälöllä 3 saatiin 10 astetta kaltevalla mäellä kertoimeksi 0,992. Tuleva pitkäaaltainen säteily kerrottiin tällä kertoimella ennen antamista tiesäämallille säteilyennusteeksi. Pitkäaaltainen säteily oletettiin kokonaan diffuusiksi. Esteen taakse jäävä taivas vaikuttaa myös poislähtevään pitkäaaltosäteilyyn. Tämän vaikutusta arvioitiin kertomalla tiesäämallissa tien emittoima säteily avonaisuuskertoimella. Tällöin lämpöä karkaa avaruuteen vähemmän.

Tiesäämallia ajettiin ottaen huomioon yksi edellä mainitusta muutoksista kerrallaan sekä ottaen kaikki kolme säteilyparametrien muutosta huomioon samanaikaiseksi. Tiesäämallin lämpötasapaino on siis kullakin ajolla hieman erilainen. Ajot tehtiin sekä etelä- että pohjoisrinteille, joiden kaltevuuskulmat olivat välillä $1-10^0$. Pohjoisrinteellä otettiin huomioon myös se, että aurinko saattaa jäädä kokonaan mäen taakse. Jos auringon korkeuskulma oli rinteen kaltevuuskulmaa pienempi, niin tulevan lyhytaaltosäteilyn oletettiin olevan kokonaan hajasäteilyä. Tällöin lyhytaaltainen säteily kerrottiin kertoimella 0,165, joka voidaan arvioida diffuusin säteilyn osuudeksi hyvin kirkkaissa olosuhteissa (Duffie, 1991).

Tunti	Alkuperäinen pintalämpötilan ennuste (°C)	Muutetun tulevan lyhytaaltoisen säteilyn vaikutus (°C)	Muutetun tulevan pitkäaaltoisen säteilyn vaikutus (°C)	Muutetun lähtevän pitkäaaltoisen säteilyn vaikutus (°C)	Kaikkien muutosten vaikutus (°C)
1	-15,2	0	0	0	0
2	-17,4	0	-0,1	0	0
3	-18,2	0	0	0,1	0,1
4	-18,7	0	-0,1	0,1	0
5	-18,7	0	-0,1	0,1	0
6	-16,9	0,5	-0,1	0,1	0,5
7	-13,3	1,6	-0,1	0,1	1,6
8	-8,8	2,6	-0,1	0,1	2,6
9	-4	3,3	-0,1	0,1	3,3
10	0,4	4,2	0	0,1	4,2
11	3,6	4,6	-0,1	0,1	4,6
12	4,6	4,4	-0,1	0,1	4,5
13	3,7	4,1	0	0,1	4,1
14	2	3,5	0	0	3,5
15	-0,5	2,8	-0,1	0,1	2,9
16	-3,9	2,5	0	0,1	2,6
17	-7	1,1	-0,1	0,1	1,1
18	-8,7	0,8	-0,1	0,1	0,9
19	-10	0,7	0	0,1	0,8
20	-11,1	0,6	0	0,1	0,6
21	-11,9	0,5	0	0,1	0,5
22	-12,5	0,4	-0,1	0,1	0,4
23	-13,2	0,4	-0,1	0,1	0,4
0	-13,9	0,4	-0,1	0,1	0,3

Taulukko 5.4. Alkuperäinen tiesäämallin antama tienpinnan lämpötila ja sen erotus eri testeissä saatuihin pintalämpötiloihin tunneittain 15.3.2013 Kaarinan tiesääasemalle. Testeissä simuloitiin lämpötilaa etelärinteellä. Ensimmäisessä sarakkeessa ovat tunnint UTC aikana ja toisessa tasaiselle maalle ennustettu pintalämpötila. Kolmannessa sarakkeessa on pintalämpötilan muutos testissä, jossa vain tulevaa lyhytaaltoista säteilyä muutettiin, verrattuna alkuperäiseen ennusteeseen. Neljännessä sarakkeessa on tulevaa pitkäaaltosäteilyä muuttaneen testin ero alkuperäiseen, viidennessä lähtevän pitkäaaltosäteilyä muuttaneen testin ero alkuperäiseen ja viimeisessä testin, jossa kaikki säteilymuokkaukset olivat mukana ero alkuperäiseen verrattuna.

5.4.2 Tulokset

Aluksi kaltevuuden vaikutusta tarkastellaan tutkimalla erikseen kolmea edellä mainittua säteilyn määrään vaikuttavaa tekijää. Rinteen kaltevuutena käytettiin 10 astetta etelään. Tämän

jälkeen tutkitaan kaikkia tekijöitä yhdessä eri kaltevuuskulmilla välillä 1-10⁰ etelärinteelle ja pohjoisrinteelle. Ensimmäisiin on käytetty vain päivän 15.3.2013 sääennustetta, kun taas jälkimmäisiin käytettiin päivien 15.3.-17.3.2013 ennustetta.

Muokatulla tulevalla lyhytaaltosäteilyllä tehdyn ennusteen muutos tasaiselle maalle tehtyyn alkuperäiseen ennusteeseen on esitetty taulukossa 5.4. Etelärinte on tulosten mukaan tasaista maata huomattavasti lämpimämpi ja lämpötilaero näkyy heti auringon noustua 0,5 asteella. Suurimmillaan ero on 4,6 °C klo 13 suomen aikaa. Vielä auringon laskettuakin etelärinte jää tasaista maata lämpimämmäksi.

Saapuvalla pitkäaaltoiselle säteilyn määrän kasvun vaikutukset ovat huomattavasti pienempiä kuin lyhytaaltoisella säteilyllä, sillä saadut lämpötilat olivat vain 0,1 °C tasaista maata kylmempiä ja kahdeksana tuntina lämpötilaeroa ei saatu lainkaan (taulukko 5.4.). Tämä johtuu siitä, että kaltevuuden ollessa näin pieni niin pieni osa taivaasta jää rinteeseen taakse, ettei sillä ole juuri vaikutusta.

Lähtevää pitkäaaltoista säteilyä vähentämällä simuloidut lämpötilat ovat lähes koko vuorokauden 0,1 °C lämpimämpiä kuin tasaiselle maalle ennustetut (taulukko 5.4.). Ero on mitättömän pieni johtuen jälleen mäen taakse jäävän taivaan osan pienuudesta. Havaitaan että tulevan ja lähtevän pitkäaaltois säteilyn muutokset suurin piirtein kumoavat toisensa, joten kun kaikki säteilyparametreihin tehdyt muutokset ovat voimassa yhtä aikaa, tienpinnan lämpötila on suunnilleen sama kuin pelkällä tulevan lyhytaaltoisen säteilyn muutoksella.

Taulukossa 5.5 on esitetty etelärinteiden kaltevuuskulmat, avonaisuuskertoimet ja rinteelle simuloitujen pintalämpötilojen keskimääräinen ero tasaiselle pinnalle saatuaan lämpötilaan verrattuna klo 12 UTC. Klo 12 UTC vastaa Suomen aikaa klo 14.00, jolloin tienpinta oli tyypillisesti lämpimimmillään. Taulukossa 5.6 ovat vastaavat tulokset pohjoisrinteille.

Jo yhden asteen kallistus etelään nostaa tienpinnan lämpötilaa puolella asteella kevättalven tilanteessa. Viiden asteen kaltevuuksilla ero on jo kaksi astetta. Etelärinteellä pintalämpötilan keskimääräinen kasvu kaltevuusastetta kohden oli 0,40 °C, Kun taas pohjoisrinteillä lämpötila laski keskimäärin 0,46 °C kaltevuusastetta kohden. Pohjoisrinteellä lämpötila muuttuu enemmän todennäköisesti siksi, että siellä otetaan huomioon kaltevuuskertoimen lisäksi auringon jääminen rinteeseen taakse. Tulokset muutoksista ovat samaa suuruusluokkaa kuin Senkovan ym. (2007) tulokset, joiden mukaan kaltevuuksien ja varjostuksien lisääminen HIRLAM:iin muutti lämpötiloja 1-3 °C. Ne sopivat yhteen myös ColdSpots-projektissa saatujen tulosten kanssa, joiden mukaan kallistuksen lisääminen malliin auringon elevaatiokulman kautta aiheuttaa korkeintaan muutamien asteiden eroja (Saarikivi ym.,2007).

Kaltevan ja tasaisen maan lämpötilaeroa on kuitenkin ilman erillisiä mittauksia hankala todentaa, sillä vain harva tiesääsema sijaitsee mäessä ja niidenkin kaltevuudet ovat pieniä.

Pitäisi löytää kaksi lähekkäistä tiesääasemaa, joista toinen on rinteessä ja toinen tasaisella maalla. Tiesääasemat ovat kuitenkin niin erillään toisistaan, että paikalliset tekijät vaikuttavat tien lämpötilaan liikaa. Lisäksi tiesäämalli on suunniteltu ennustamaan nimenomaan tienpinnan jäätymistä, joten mallin suunnittelussa on haluttu sen mieluummin aliarvioivan kuin yliarvioivan lämpötilaa, vaikka se pyrkiikin tarkkaan ennusteeseen (Saarikivi ym., 2007). Tehdyissä ajoissa aurinkoisina päivinä tiesäämalli antoi huomattavasti pienempiä lämpötiloja kuin havainnot. Tällöin mikä tahansa, mikä lisää tienpinnan lämpötilaa, näyttäisi parantavan ennustetta, joten kaltevan etelärinteen vaikutuksen lisääminen malliin parantaisi tulosta missä tahansa aurinkoisena päivänä. Täten rinteen vaikutusta tuloksiin on hankala verifioida havainnoilla.

Kaltevuuskulma (°)	Kaltevuuskerroin	Avonaisuuskerroin	Kaltevan tason lämpötila – tasaisen maan lämpötila (°C)
0	1,00	1,0000	0,0
1	1,03	0,9999	0,4
2	1,07	0,9997	0,8
3	1,10	0,9993	1,3
4	1,13	0,9988	1,7
5	1,17	0,9981	2,1
6	1,20	0,9973	2,5
7	1,24	0,9963	2,9
8	1,27	0,9951	3,3
9	1,31	0,9938	3,8
10	1,34	0,9924	4,0

Taulukko 5.5. Etelärinteen pintalämpötilaero tasaiseen tienpintaan verrattuna. Ensimmäisessä sarakkeessa on kaltevuuskulma, toisessa kaltevuuskerroin, kolmannessa avonaisuuskerroin ja neljännessä pintalämpötilaero tasaiseen alustaan verrattuna. Arvot ovat klo 12 UTC arvojen keskiarvoja päiviltä 15.- 17.3.2013 Kaarinan tiesääasemalle.

Tuloksiin on voinut aiheutua virhettä siitä, että kahden metrin lämpötilaa ei ole korjattu millään tavalla. Tiesäämalli hakeutuu energiatasapainoon siten, että kahden metrin lämpötila pysyy HARMONIE:n ennusteessa saadussa. Tällöin etelärinne jäähtyy normaalia enemmän, kun pinnan lämpenemisellä ei ole vaikutusta ilman lämpötilaan. Pohjoisrinne taas voi vastaavasti jäädä normaalia lämpimämmäksi. Ilman lämpötila vaikuttaa myös ilman saturaatiohöyrynpaineeseen ja sitä kautta kuuran muodostukseen. Lisäksi mallinnusta tehdessä oletettiin täysin kirkkaat olosuhteet, mitkä harvoin pitävät paikkaansa. Tämä on voinut tehdä oletetun hajasäteilyn määrän todellista pienemmäksi.

Kaltevuuskulma (⁰)	Kaltevuuskerroin	Avonaisuuskerroin	Kaltevan tason lämpötila – tasaisen maan lämpötila (⁰ C)
0	1,00	1,0000	0,0
1	0,97	0,9999	-0,4
2	0,93	0,9997	-0,9
3	0,9	0,9993	-1,3
4	0,87	0,9988	-1,7
5	0,83	0,9981	-2,2
6	0,8	0,9973	-2,6
7	0,76	0,9963	-3,1
8	0,73	0,9951	-3,5
9	0,69	0,9938	-4,0
10	0,66	0,9924	-4,5

Taulukko 5.6. Pohjoisrinteen pintalämpötilaero tasaiseen tienpintaan verrattuna. Ensimmäisessä sarakkeessa on kaltevuuskulma, toisessa kaltevuuskerroin, kolmannessa avonaisuuskerroin ja neljännessä pintalämpötilaero tasaiseen alustaan verrattuna. Arvot ovat klo 12 UTC arvojen keskiarvoja päiviltä 15.- 17.3.2013 Kaarinan tiesääasemalle.

5.5 Varjostus

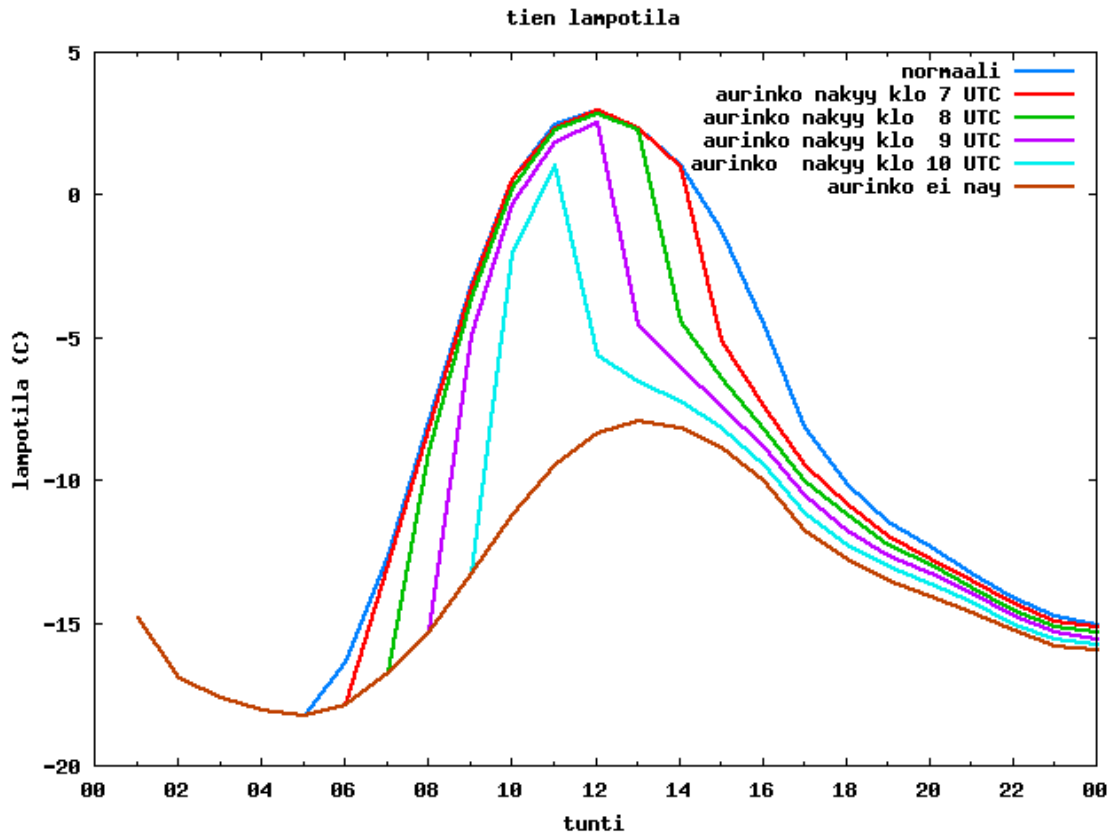
5.5.1 Menetelmät

Auringon tiellä olevan esteen vaikutusta tienpinnan lämpötilaan tutkittiin simuloimalla mallissa koko eteläisen horisontin kattavaa estettä. Esteen peittävyyttä vaihdeltiin siten, että aurinko tuli esiin ja poistui näkyvistä eri aikoihin. Ensimmäisessä ajossa aurinko oli näkyvissä klo 9-16 Suomen aikaa, toisessa klo 10-15, kolmannessa klo 11-14, neljännessä klo 12-13 ja viidennessä aurinko oli koko päivän esteen takana. Klo 12 15.3. auringon korkeuskulma on 27,3⁰. On kuitenkin huomioitava, että mallille annettu säteilyennuste on tunnin keskiarvoina. Keskiarvoistusväli on tasatunnista tasatuntiin, joten säteilyennuste kuvaa parhaiten välin keskikohdan eli seuraavan puolitunnin arvoa. Esimerkiksi klo 12 säteilyennuste on ennusteen keskiarvo väliltä klo 12.00- 13.00 ja kuvaa parhaiten klo 12.30 arvoa. Auringon ollessa esteen takana kaikki lyhytaaltainen säteily oletettiin diffuusiksi. Diffuusin säteilyn määräksi arvioitiin 16,5 % lyhytaaltoisen säteilyn määrästä, kuten pohjoiseen päin kaltevan rinteiden kohdallakin. Mallia ajettiin Kaarinan asemalle päiville 15.3., 16.3. ja 17.3., jotka olivat lähes pilvettömiä. Esteen vaikutusta avonaisuuskertoimeen ja sitä kautta tulevaan ja lähtevään pitkäaaltoiseen säteilyyn ei otettu huomioon, sillä vaikutukset mäen kaltevuudelle tehdyissä simulaatioissa osoittivat, että ne suunnilleen kumoavat toisensa.

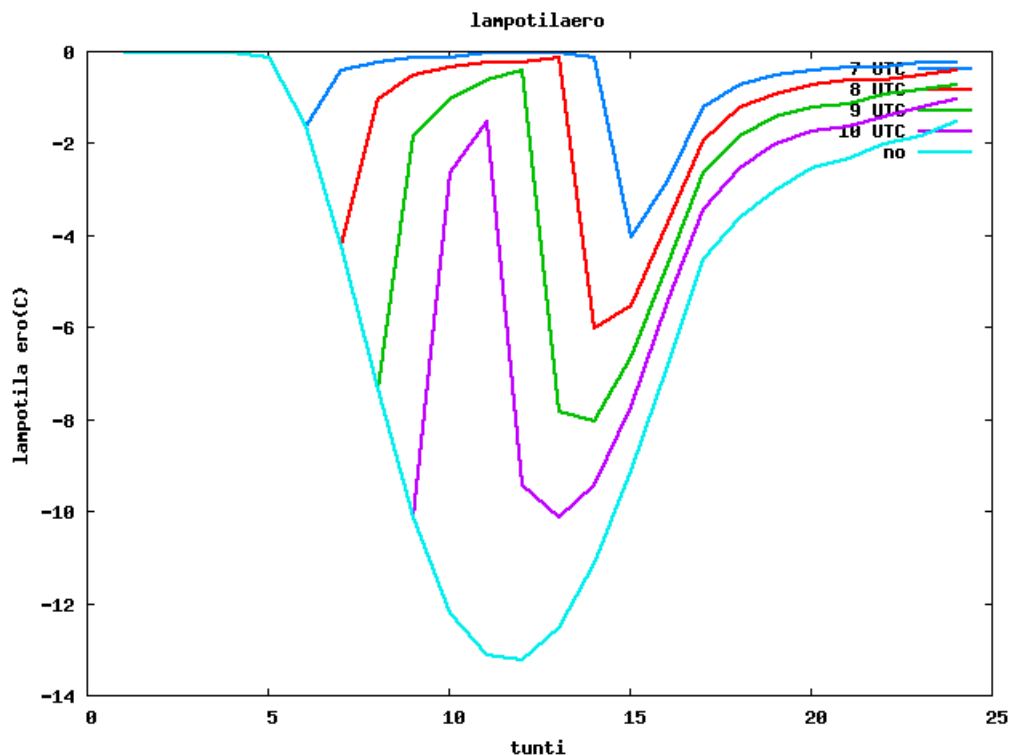
5.5.2 Tulokset

Kuvassa 5.5 näkyy 17.3.2013 Kaarinan asemalle ennustetut lämpötilat eri simulaatioilla, joilla mallinnettiin etelässä olevaa estettä. Samantyyppinen kuva saatiin muillekin päiville, joille simulaatioita tehtiin. Kuvassa 5.6 taas näkyy 17. päivän eri asemille tehtyjen simulaatioajojen keskimääräinen ero normaaliasetuksilla tehdystä ajosta. Erot näyttävät olevan tällaisena aurinkoisena maaliskuun päivänä olevan merkittäviä etenkin jos aurinko on useamman tunnin peitossa. Esteen varjostuksen vaikutuksesta tien pinta on huomattavasti viileämpi. Aamulla vaikutus näyttäisi olevan pienempi, ja ajoissa joissa aurinko nousi ennen puoltapäivää, keskipäivän lämpötila nousee lähes normaaliajon tasolle. Kahdessa ensimmäisessä ajossa, joissa ensimmäisessä aurinko meni esteen taakse klo 16 ja toisessa klo 15, havaitaan että lämpötilaero normaaliajoon nähden on noin kaksi astetta suurempi iltapäivällä heti auringon mentyä esteen taakse kuin aamulla ensimmäisessä ajossa klo 9 ja toisessa klo 10 juuri ennen kuin aurinko tuli esiin. Näyttäisi siltä, että varjostus illalla vaikuttaisi lämpötilaan enemmän kuin varjostus aamulla. Aamullakin lämpötilaerot ovat kuitenkin useita asteita. Syy eroon voi olla se, että aamulla on kylmempää kuin iltapäivällä ja että lämpötasapaino on herkempi auringonsäteilylle lämpimissä tilanteissa. Pysyäkseen lämpimänä pinta tarvitsee jatkuvaa säteilylämmitystä ja lämmityksen loppuessa jäähtyminen on nopeaa. Ajoissa, joissa aurinko jäi esteen taakse klo 14 ja 13, aamun ja iltapäivän lämpötilaero on samaa suuruusluokkaa, ensimmäisessä -8°C ja toisessa -10°C . Ajossa, jossa aurinko ei näkynyt lainkaan, lämpötilaero on jopa 13°C klo 14 Suomen aikaa. Lämpötilaerot ovat näkyvissä kaikilla ajoilla vielä keskiyölläkin, jolloin ajojen lämpötilaerot normaaliajoon nähden vaihtelevat välillä $-0,3 \dots -2,0^{\circ}\text{C}$.

Saadut tulokset ovat samantapaisia Bogren ym. (2000a) saamien tulosten kanssa. He tutkivat varjostuksen vaikutusta lämpötilaan vertaillen mittausasemia, joista yhdelle aurinko paistoi koko päivän, kun taas muille kolmelle aurinko jäi esteen taakse joko aamupäiväksi, keskipäiväksi tai iltapäiväksi. Mittaukset tehtiin Ruotsissa leveyspiirillä 58°N maaliskuun alussa ja auringon suurin korkeuskulma oli 27° , joten olosuhteet olivat melko samanlaiset kuin Kaarinan tiesääasemalla 17.3. Heidän tuloksissaan keskipäivän varjossa olevan ja varjostamattoman tiesääaseman lämpötila erosi toisistaan 10°C , mikä sopii hyvin yhteen tässä tutkimuksessa saatujen tulosten kanssa. He havaitsivat myös, että auringon mennessä esteen taakse lämpötilan lasku oli hyvin nopeaa. Esimerkiksi mittausasemalla, joka meni varjoon iltapäivällä, lämpötila laski $7,5^{\circ}\text{C}$ alle tunnissa. Bogren ym. (2000a) havaitsivat myös, että varjostuksen vaikutus voi jatkua vielä useamman tunnin auringonlaskun jälkeenkin.



Kuva 5.5. Auringon esteen taakse jäämisen vaikutus tienpinnan lämpötilaan. Simulaatiot on tehty Kaarinan tiesääasemalle 17.3.2013. Kirkkaan sinisellä viivalla näkyy normaaliasetuksilla tehty ajo. Punaisella viivalla on piirretty ajo, jossa aurinko oli näkyvissä klo 9-16 suomen aikaa, sinisellä vihreällä viivalla ajo, jossa aurinko näkyi 10-15, violetilla ajo, jossa aurinko näkyi klo 11-14, vaalean sinisellä ajo, jossa aurinko näkyi klo 12-13 ja ruskealla ajo jossa aurinko ei näkynyt lainkaan ennustus pisteeseen. Kuvassa aika-akseli on UTC-ajasa.



Kuva 5.6. Simulaatioiden, joissa mallinnettiin auringon jäämistä esteen taakse eri kellonaikoina, ero normaaliasetuksilla tehtyyn ajoon. Arvot ovat 16 aseman keskiarvoja, jotka on tehty päivälle 17.3.2013. Kirkkaan sinisellä viivalla on ajon, jossa aurinko oli näkyvissä klo 9-16 Suomen aikaa, ero normaaliasetuksilla tehtyyn ajoon. Punaisella viivalla on vastaava ero ajolle, jossa aurinko oli näkyvissä klo 10-15, vihreällä viivalla ajon, jossa aurinko olin näkyvissä klo 11-14 vastaava ero, violetilla viivalla ajon, jossa aurinko oli näkyvissä klo 12-13 vastaava ero ja vaalean sinisellä viivalla vastaava ero ajolle jossa aurinko ei näkynyt lainkaan. Kuvassa aika-akseli on UTC-ajassa.

5.6 Silta

5.5.1 Menetelmät

Sillan pintalämpötiloja tutkittiin muuttamalla tiesäämallin laskentakerroksia ja vaihtamalla alimman kerroksen lämpötila ilman lämpötilaksi, kuten on tehty myös METRo-mallissa (Crevier ja Delage, 2001). Tarkempien tulosten saamiseksi olisi sillan alapinnan lämpötila laskettava erikseen, mutta se edellyttäisi lämpötasapainoyhtälön ratkaisemista uudelleen. Tämä monimutkaistaisi prosessia liikaa, joten tässä tutkimuksessa tyydyttiin tähän yksinkertaistukseen. Tiesäämalli ajettiin erikseen 1 metrin, 0,5 metrin ja 0,2 metrin paksuiselle sillalle. Kukin näistä jaettiin kahdeksaan laskentakerrokseen, joiden alapintojen korkeudet ovat taulukossa 5.7. Pintakerroksen fysikaalisina ominaisuuksina käytettiin samoja arvoja kuin

varsinaisessa tiesäämallissa, mutta alempien kerrosten ominaisuudet vaihdettiin teräsbetonin ominaisuuksiksi. Teräksen osuudeksi oletettiin tilavuudesta yksi prosentti, mitä käyttäen teräsbetonin tiheys ja lämpökapasiteetti laskettiin painotettuna keskiarvona teräksen ja betonin ominaisuuksista. Tiheyden arvoksi saatiin 2450 kg/m^3 , lämpökapasiteetiksi $2,13 \cdot 10^6 \text{ J/(m}^3\text{K)}$. Huokoisuuden arvona käytettiin 5 % (Miloud, 2005). Saven osuuden oletettiin olevan sama kuin pintakerroksellakin. Mallia ajettiin kullekin sillalle 16 eri pisteessä seitsemän eri päivän ennusteella. Päivät olivat 18.1., 30.1., 9.2., 3.3., 6.3., 15.3. ja 20.3.

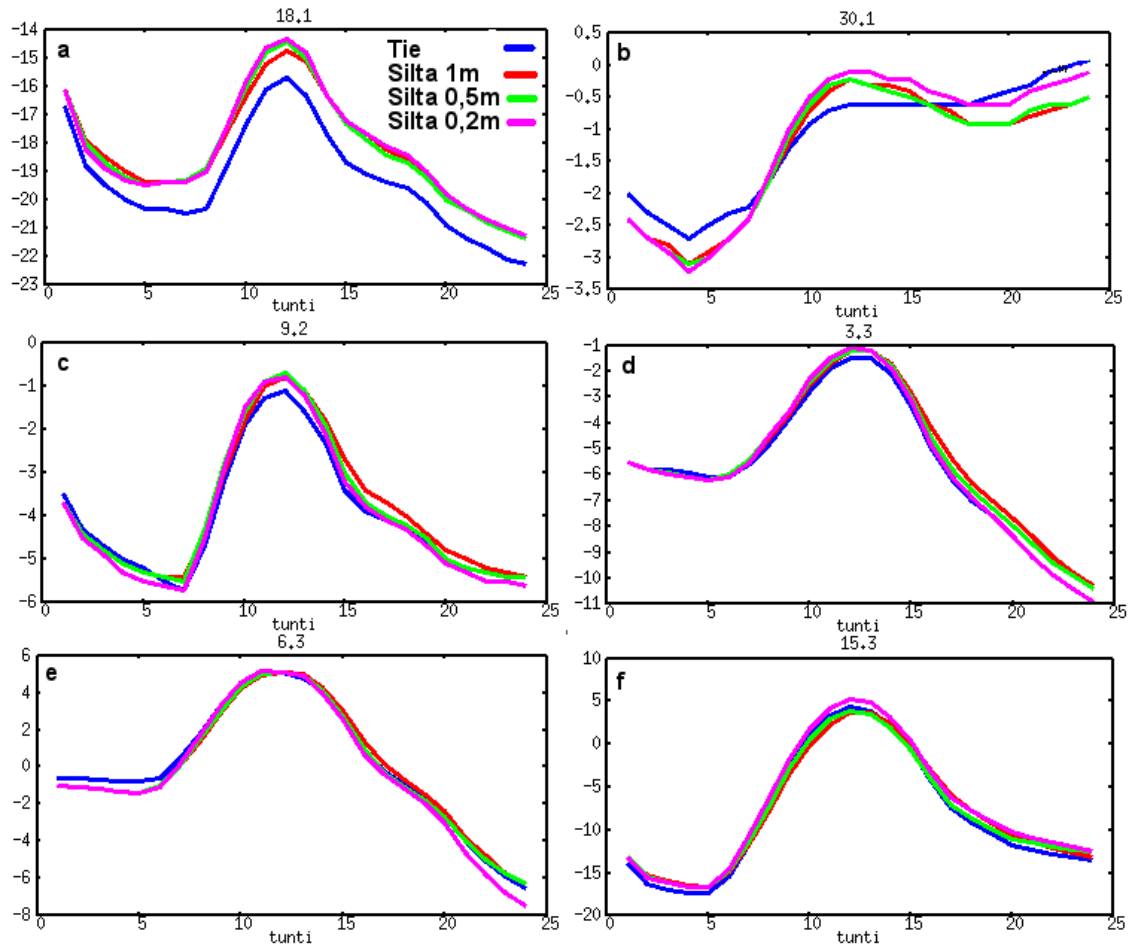
	Kerroksen alapinnan korkeus (m), Silta 1 m	Kerroksen alapinnan korkeus (m), Silta 0,5 m	Kerroksen alapinnan korkeus (m), Silta 0,2 m
Kerros 1	0,00	0,00	0,00
Kerros 2	0,04	0,04	0,02
Kerros 3	0,15	0,10	0,05
Kerros 4	0,30	0,18	0,08
Kerros 5	0,70	0,32	0,11
Kerros 6	0,85	0,40	0,15
Kerros 7	0,96	0,46	0,18
Kerros 8	1,00	0,50	0,20

Taulukko 5.7. 1; 0,5 ja 0,2 metrin paksuisten siltojen eri kerrosten alapintojen korkeudet

5.5.1 Tulokset

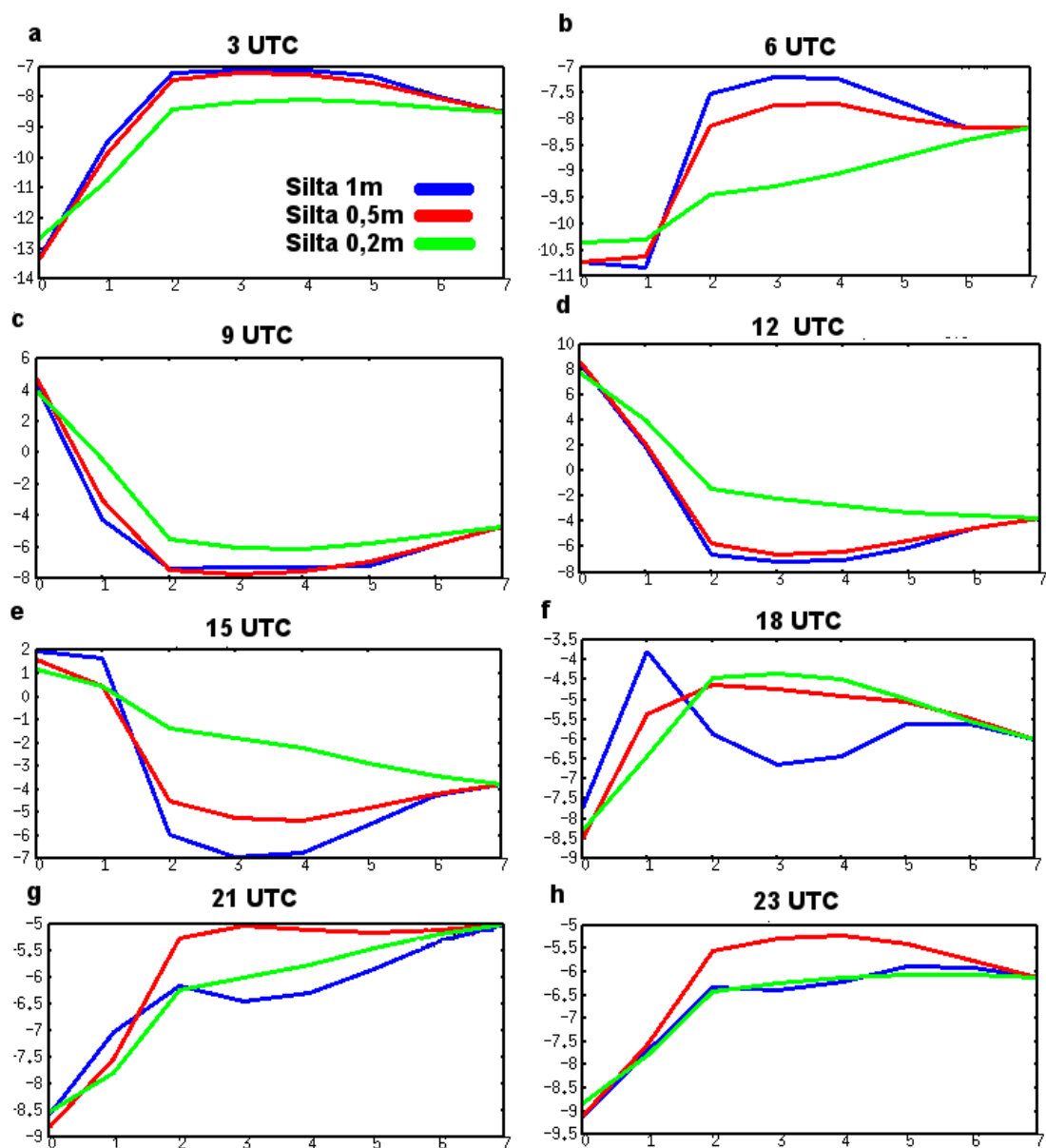
Kuvassa 5.7 on nähtävillä tavalliselle tielle ja eripaksuisille silloille simuloidut pintalämpötilan päiväsyklit kuudelta tutkimuspäivältä. Arvot ovat 16 aseman keskiarvoja. Kuvassa 5.8 on puolestaan nähtävissä eri silloille Hangon tiesääaseman koordinaatteihin simuloidut lämpötilaprofiilit 15.3. eri kellonajoilta. Profiilikuvista nähdään, että ohuimman sillan lämpötilaprofiili tasoittuu huomattavasti 1 metrin ja 0,5 metrin paksuisten siltojen lämpötilaprofiilia nopeammin. Paksummilla silloilla havaitaan selvää aaltomaisuutta, kun keskiosien lämpötila ei ehdi seurata pintavaihteluja.

Silloille ja tasaiselle maalle simuloidut pintalämpötilat eivät eroa paljoa toisistaan ja suurimmillaankin ero on vain $1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Lämpötilaerot kuitenkin vaihtelevat sekä merkittävästi että suuruudeltaan päivästä toiseen. 18.1. ja 15.3. tavallinen tie on yöllä hieman siltaa kylmempi, kun taas 30.1., 9.2. ja 6.3. tavallinen tie on lämpimämpi. 18.1. ja 15.3. ilma oli yöllä hyvin kylmää, kun taas jälkimmäiseksi mainitut kolme yötä olivat melko leutoja, mikä käy ilmi kuvasta 4.2. Selitystä ilmiölle on hankala löytää, sillä pienemmän lämpökapasiteetin omaavan sillan luulisi jäähtyvän kylmänä yöllä enemmän kuin tasaisen maan, kuten leutoinkin öinä tapahtuu. Asian selvittäminen vaatii tarkempia tutkimuksia.



Kuva 5.7. Pintalämpötilan vuorokausisykli tiellä ja eri paksuisilla silloilla. Arvot ovat 16 aseman keskiarvoja. x-akselilla ovat tunnit UTC ajassa ja y aksellilla lämpötila celciusasteina. Jokaisessa kuvassa viivojen värien selitykset ovat samat kuin kuvasa a.

Päiväsaikaan silta on aina joko lämpimämpi tai suunnilleen yhtä lämmin kuin tasaisen maa. Tämä selittynee sillan pienemmällä lämpökapasiteetilla, jolloin se lämpenee auringon vaikutuksesta enemmän. Mielenkiintoinen tapaus on 15.3., jolloin 0,2 m paksu silta on tasaista maata lämpimämpi ja 1m ja 0,5 metriä paksut sillat kylmempiä. 15.3. oli aurinkoinen ja selkeä päivä ja auringon lämmitysvaikutus oli voimakas pintalämpötilaan, mutta ilman lämpötila ei kuitenkaan kohonnut yli nollan asteen. Paksummat sillat lämpenevät ohuinta siltaa vähemmän todennäköisesti siksi, että niiden keskiosien lämpötila reagoi lämpötilamuutoksiin hitaammin. Niiden keskiosien lämpötila ei ole vielä ehtinyt kohota kylmän yön jälkeen, kun taas 0,2 m paksun sillan lämpötilaprofiili tasoittuu nopeammin. Näin ohuimman sillan keskiosien jäädyttävä vaikutus ei ole niin suuri kuin paksummilla silloilla. Tasaisella maalla juuri pinnan alapuolella sijaitsevien kerrosten lämpötila osuu ilmeisesti eri paksuisten siltojen keskiosien lämpötilojen välimaastoon, koska kerrokset jäädyttävät maan pintaa vähemmän kuin paksuilla silloilla mutta enemmän kuin ohuimmalla sillalla.



Kuva 5.8 Eri paksuisten siltojen lämpötilaprofiilit eri kellonaikoina 15.3.2013. Simulaatiot on tehty Hangon tiesääaseman koordinaatteihin. y-akselilla on lämpötila celsiusasteina ja x-akselilla ovat kerrokset siten, että ylin kerros on vasemmalla. On tärkeää huomioida, että eri silloille kerrokset ovat eri paksuisia ja eri syvyydellä. Kunkin sillan kerrosten alapintojen korkeudet ovat taulukossa 5.2.

Siltaominaisuuden lisääminen tiesäämalliin muutti pinta-lämpötilaa kaiken kaikkiaan yllättävän vähän. Tämä voi johtua mallissa tehdyistä yksinkertaistuksista ja siitä, ettei ympäristöolosuhteita muutettu mitenkään. Esimerkiksi sillat ovat yleensä tavallista tietä tuulisempia. Voi myös olla, että sillan lämpökapasiteetti ja muut ominaisuudet arvioitiin mallinnuksessa väärin ja että sillan rakenne oli mallissa liian yksinkertaistettu. Tuloksia ei voitu

kuitenkaan verifioida, sillä sopivia mittauksia ei ollut saatavilla. Asiaa voitaisiin tutkia mittaamalla läheisten silta- ja maapisteen lämpötiloja toisiinsa. Pisteiden etäisyys ei voisi kuitenkaan olla suuri, jotta muiden ympäristötekijöiden vaikutus olisi riittävän pieni.

6. YHTEENVETO

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää paikallisten tekijöiden vaikutusta tienpinnan lämpötilaan ja tutkia Ilmatieteen laitoksen tiesäämallin herkkyyttä näille tekijöille. Aikaisemmista tutkimuksista voidaan todeta, että paikalliset tekijät, kuten tien avoimuus, korkeuserot, varjostukset ja maankäyttö, vaikuttavat merkittävästi tienpinnan paikalliseen lämpötilaan. Työssä tutkittiin, että näkykö sillan tai mäen vaikutus tiesääennusteiden osuvuudessa. Tiesäämallin herkkyyttä tutkittiin pinnan albedon, päällysteen paksuuden, tien kaltevuuden ja varjostuksen suhteen. Lisäksi testattiin, miten siltapaikkojen mallintaminen onnistuu tiesäämallilla.

Tiesääennusteiden ei havaittu olevan merkittävästi parempia tasaisella maalla sijaitseville tiesääasemille kuin sillalla tai mäessä sijaitseville tiesääasemillekaan. Tämä saattaa kuitenkin johtua siitä, että mallille annetun sääennusteen virheet peittivät paikallisten tekijöiden aiheuttamat virheet alleen. Asian tarkempaan tutkimukseen tarvitaan tarkempia ennusteita. On myös mahdollista verrata synop-asemien havainnoilla simuloituja tienpintalämpötiloja ja havaittuja tienpintalämpötiloja keskenään.

Kokonaisuudessaan voidaan todeta, että paikallisten tekijöiden vaikutuksen lisääminen tiesäämalliin muuttaa ennustettuja pintalämpötiloja. Mitä enemmän olosuhteet eroavat keskimääräisistä, sitä suurempia erot ovat. Tärkein vaikuttava tekijä on tien varjostus, mikä aiheuttaa suurimpia lämpötilaeroja. Suurin saatu ero varjostetun ja varjostamattoman tienpinnan lämpötilan välillä oli 13 °C. Tulos saatiin ajossa, jossa varjostus kesti koko päivän. Erityisesti auringon siirtyminen esteen taakse iltapäivällä pudotti lämpötilaa nopeasti. Vähiten lämpötilaan vaikutti albedon muuttaminen, sillä sen aiheuttama muutos oli suurimmillaankin vain yksi aste.

Päällysteen paksuus ja kaltevuus olivat toiseksi tärkeimmät tutkituista pinnan lämpötilaan vaikuttavista tekijöistä. Molempien vaikutus on huomattavasti suurempi aurinkoisina kuin pilvisinä päivinä. Oikeastaan kaltevuuden vaikutusta ei edes tutkittu pilvisinä päivinä, sillä kaikki säteily on silloin diffuusia eikä kaltevan ja tasaisen pinnan saaman säteilyn määrällä ole juuri eroja. 2cm ja 21 cm paksuisten teiden välillä suurimman ja pienimmän lämpötilan erotus vaihteli vain reilun asteen 30.3, mutta paksuudessa on todellisuudessa 20 cm eroja todennäköisesti vain harvoin. Aurinkoisena päivänä kuitenkin jo 4 cm paksuuden lisääminen laski pienimmän ja suurimman lämpötilan erotusta kahdella asteella.

Tien kaltevuuden vaikutus lämpötilaan riippuu paljon rinteiden suunnasta. Viisi astetta kaltevalla etelään suuntautuvalla rinteellä lämpötilaeroksi tasaisen maan kanssa saatiin

aurinkoisena kevätpäivänä 2,1 °C klo 12 UTC, kun taas yhtä kaltevalla pohjoiseen suuntautuvalla rinteellä ero oli -2,2 °C samana ajankohtana. Kaltevuudella onkin eniten vaikutusta silloin, kun rinne on suuntautunut lähes pohjoiseen tai etelään. Vaikka teiden kaltevuudet ovat Suomessa yleensä pieniä, tällaisilla rinteillä kaltevuus voi tulla merkittäväksi tekijäksi.

Sillan lisääminen tiesäämalliin muutti pintalämpötiloja melko vähän ja ero oli enimmilläänkin vain 1,5 °C. Sillan vaikutus oli tutkituista tekijöistä toiseksi pienin. Kokeet kertoivat kuitenkin paljon sillan lämpötilan käyttäytymisestä eri tilanteissa. Päivisin sillan lämpötila kohoaa yleensä tasaista maata korkeammaksi ja yöllä ero riippuu ilman lämpötilasta. Todellisuudessa sillan ja tasaisen tien välillä on todennäköisesti enemmän eroa, sillä ajoissa ei huomioitu lainkaan kosteuden ja tuulisuuden lisääntymistä sillalla.

Kokonaisuuden huomioon ottaen työ saavutti tavoitteensa hyvin. Vaikka paikallisten tekijöiden aiheuttamat lämpötilaerot ovat useimmiten vain muutaman asteen luokkaa, voi erolla olla silti huomattavaa merkitystä lämpötilan ollessa lähellä nollaa. Varjostetuilla alueilla erot ovat suurempia ja lämpötila voi muuttua nopeasti, joten niiden vaikutus liikenneturvallisuuteen voi olla merkittävä. Paikallisten tekijöiden aiheuttamat lämpötilaerot riippuvat kuitenkin paljon säätilasta. Kaikilla tutkituilla tekijöillä näyttäisi olevan eniten vaikutusta liukkauteen kirkkaina päivinä keväällä ja syksyllä, kun auringon säteilyä on tarjolla paljon. Kesällä säteilyä on tietysti tarjolla eniten, mutta tällöin on harvoin niin kylmää, että sillä olisi mitään merkitystä kelin kannalta. Pilvisinä ja kylminä päivinä erot ovat huomattavasti pienempiä.

Tiesäämallin antaman ennusteen luotettavuus riippuu paljon sille annettavan lähtöennusteen luotettavuudesta. Säämallien tarkkuuden paranemisen myötä myös tiesääennusteet paranevat. Tiesäämallia voidaan kuitenkin myös itsessään kehittää. Tärkeimmäksi kehityksen kohteeksi näen nimenomaan paikallisten tekijöiden lisäämisen malliin. Tämä ei kuitenkaan ole yksinkertaista, sillä tällaisten tekijöiden kartoittaminen on hyvin työlästä. Suomen tiestölle voitaisiin tehdä laajamittainen lämpökartoitus, mutta se edellyttäisi saman tien kartoittamista useaan otteeseen eri säätilanteissa (Saarikivi ym. 2007). Lämpökartoituksella tarkoitetaan menetelmää, jossa ajoneuvon on kiinnitetty lämpötila-anturi ja sillä ajetaan kartoitettavilla teillä erilaisissa säteilyolosuhteissa. Tämän jälkeen voidaan laskea, miten kunkin paikan lämpötila eroaa tiestön keskimääräisestä lämpötilasta (Shao ym., 1996). Lämpökartoituksen pohjalta mallin tuloksiin voisi tehdä tilastollisia korjauksia. Chapman ym (2001b) ovat osoittaneet, että lämpötilavaihteluita voidaan mallintaa myös numeerisesti paikallisten tekijöiden, kuten topografian ja avonaisuuskertoimen, avulla. Geografista tietoa löytyy koko Suomesta, ja sitä voitaisiinkin hyödyntää tiesään mallinnuksessa. Teiden kaltevuudesta löytyy tietoa tierekisteristä (Saarikivi ym., 2007).

Avonaisuuskertoimesta ei ole tehty koko Suomen kattavaa kartoitusta, mutta Google on kuvannut katunäkymäpalveluaan varten 360° kattavalla kameralla kaikki tai lähes kaikki

Suomen yleisimmät tiet. Tällaisista kuvista voidaan laskea avonaisuuskerroin ja se, mihin aikaan aurinko jää esteen peittoon (Chapman ym., 2001b). Googlen kuvaamaa aineistoa olisi siis Googlen luvalla mahdollista hyödyntää tiesäämallinnuksen parantamisessa. Lisää Street-View palvelusta voi lukea Anguelovin ym. (2010) artikkelista. Avoimuuskertoimen määrittäminen ei kuitenkaan ole ongelmaton, sillä esimerkiksi kasvillisuuden aiheuttama varjostus riippuu vuodenaikasta. Myös tienpinnan albedoa voisi arvioida aineiston avulla, mutta sekin muuttuu ajan kuluessa, joten kuvasta saadaan vain sen hetkinen albedon arvo.

Tien rakenteen huomioon ottaminen edellyttäisi laajaa mittauskampanjaa, sillä Suomen teiden rakenteesta ei ole olemassa juuri paikallista tietoa. Mittausten toteuttaminen voisi olla mahdollista esimerkiksi maanläpäisevän tutkan avulla (Maser ja Scullion, 1992). Tämä kuitenkin veisi niin paljon aikaa ja rahaa, että tällaista kampanjaa olisi käytännössä vaikea toteuttaa.

Mikäli paikallisten tekijöiden vaikutusta malliin lisätään, ei ole kuitenkaan varmaa että ennusteiden osuvuus paranee. Esimerkiksi varjostuksen lisääminen saattaisi parantaa ennustetta vain siksi, sillä tiesäämallille on tyypillistä muutenkin ennustaa liian alhaisia lämpötiloja. Mallia tulisi siis testata ja tuloksia verifioida huolellisesti ennen käyttöönottoa ja huomiota tulisi kiinnittää myös korkeiden lämpötilojen ennustamisen parantamiseen.

KIITOKSET

Ilmatieteen laitokselta tahdon kiittää ohjaajaani Marjo Hippiä kaikesta avusta ja kommenteista työni suhteen. Lisäksi tahdon kiittää Sami Niemelää, jolta sain myös kommentteja ja apua malliennusteiden kanssa. Markku Kangasta kiitän suuresta avusta tiesäämallin suhteen erityisesti sillan mallintamisen osalta. Evgeny Atlaskinille puolestaan tahdon antaa suuret kiitokset HARMONIE:n ennusteiden hakemisessa auttamisessa. Destialta haluan kiittää Seppo Kaarta, joka auttoi sopivien tiesääasemien valitsemisessa. Kiitän lisäksi Jouni Räisästä ja Heikki Järvistä Helsingin yliopistolta, joilta sain apua tutkielmani jäsentelyn ja ulkoasun laatimisessa.

KIRJALLISUUSLUETTELO

- Alastalo, J., S. Jaakonaho, P. Nikulainen, S. Peltonen, H. Pyykkö ja K. Wahlsten, 2001: *Katupoikkileikkausten suunnitteluohje*. Helsingin kaupunki, KSV/L-os. 5.11.2001 KW, 18 s.
- Anguelov, D., C. Dulong, D. Filip, C. Frueh, S. Lafron, R. Lyon, A. Ogale, L. Vincent ja J. Weaver, 2010: Capturing the world at street level. *Computer*, June 2010, 32-38
- Barry, R. ja R. J. Chorley, 1971: *Atmosphere, Weather & Climate*. Second edition. Butter & Tanner Ltd, Lontoo, 379 s.
- Bogren, J., 1991: Screening effects on road surface temperature and road slipperiness. J. *Theoretical Appl. Climatol.*, **43**, 91-99
- Bogren, J., T. Gustavsson, M. Karlsson ja U. Postgård, 2000a: The impact of screening on road surface temperature. *Meteorol. Appl.*, **7**, 97-104
- Bogren, J. T. Gustavsson ja U. Postgård, 2000b: Local temperature differences in relation to weather parameters. *Int. J. Climatol.* **20**, 151-170.
- Campbell, G. S., 1985: *Soil Physics with Basic*. Elsevier, Netherlands, 150 s.
- Chapman, L., J. E. Thornes ja A. V. Bradley, 2001a: Modeling of road surface temperature from a geographical parameter database. Part 1: Statistical. *Meteorol. Appl.* **8**, 409-419
- Chapman, L., J. E. Thornes ja A. V. Bradley, 2001b: Modeling of road surface temperature from a geographical parameter database. Part 2, Numerical. *Meteorol. Appl.* **8**, 421-436
- Chapman, L., J. E. Thornes ja A. V. Bradley, 2001c: Rapid determination of canyon geometry parameters for use in surface radiation budgets. *Theor. Appl. Climatol.* **69**, 81-89
- Conte, S. D. ja C. de Boor, 1980: *Elementary numerical Analysis: Algorithmic Approach*, Third edition, McGraw-Hill, USA. 408 s.
- Crevier, L. ja Y. Delage, 2001: METRo: A New Model for Road-Condition Forecasting. *J. Appl. Meteor.*, **40**, 2026-2037
- Duffie, J. A., W. A. Beckman, 1991: *Solar engineering of thermal processes*. Wiley-Interscience publication, USA, 919 s.
- Eriksson, M., ja J. Norrman, 2001: Analysis of station locations in road weather information system. *Meteorol. Appl.* **8**, 437-488.
- Greenfield, T. M. ja E. S. Takle, 2006: Bridge Frost Prediction by Heat and Mass Transfer Methods. *J. Appl. Meteorol.*, **45**, 517-525
- Hellinen, T., 2007: *Liukkauden torjunta ja sen ennustaminen Ilmatieteen laitoksen tiesäämallin avulla*. Pro gradu, Helsingin yliopiston fysikaalisten tieteiden laitos 51 s.

- Hippi, M., 2004: *Teiden talvihoito ja Ilmatieteen laitoksen tiesäämallin jatkokehittäminen*. Pro gradu, Helsingin yliopiston fysikaalisten tieteiden laitos. 51 s.
- Hippi, M., P. Nurmi ja P. Saarikivi, 2008: *Development Project ColdSpots: Towards More Detailed Road Condition Forecasts*. 14th Conference of Standing International Road Weather Commission, saatavilla www.sirwec.org/prague2008.htm (viitattu 13.8.2013), 6 s.
- Juga I., P. Nurmi ja M. Hippi, 2013: Statistical modeling of wintertime road surface friction. *Meteorol. Appl.*, **20**, 318-329
- Kangas, M. M. Hippi, J. Ruotsalainen, S. Näsman, R. Ruuhela, A. Venäläinen ja M. Heikinheimo, 2006: The FMI Road Weather Model, *HIRLAM Newsletter*, **51**, 117-123.
- Kangas, M., M. Heikinheimo, M. Hippi, J. Ruotsalainen, S. Näsman, I. Juga, E. Atlaskin, P. Nurmi, T. Sukuvaara, 2012: *The FMI Road Weather Model*. 16th Conference of Standing International Road Weather Commission, saatavilla www.sirwec2012.fi (viitattu 13.8.2013), 8 s.
- Kivinen, A., 2011: Keskisuomalaisen pyörämäkitesti, Jussinparta kruunattiin mäkien kuninkaaksi. *Keskisuomalainen* 18.8.2011, julkaisi <http://www.ksml.fi/uutiset/keski-suomi/jussinparta-kruunattiin-makien-kuninkaaksi/918551> (viitattu 12.8.2013)
- Lauros, J., 2001: *Tienpinnan talviset liukkaussuhteet ja niiden mallintaminen*. Pro gradu, Helsingin yliopiston fysikaalisten tieteiden laitos. 57 s.
- Maser, K.R.T., T. Scullion, 1992, Automated pavement subsurface profiling using radar: case studies of four experimental field sites. *Transportation Research Record*, **1344**, 148-154.
- Miloud, B., 2005: Permeability and porosity characteristics of steel fiber reinforced concrete. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, **6**, 317-330
- Müller, M.D. and D. Scherer, 2005: A grid- and subgrid-scale radiation parametrization of topographic effects for mesoscale weather forecast models. *Mon. Wea. Rev.* **133**, 1431-1442
- Nysten, E., 1980: *Determination and forecasting of road surface temperature in the cost 30 automatic road station (CARS)*. Technical report No. **23**, Finnish Meteorological Institute, Helsinki 33 s.
- Oke, T. R., 1987: *Boundary layer climates*. Second edition. Methuen & Co. Cambridge, 435 s.
- Oke, T. R., G. Johnson, D. G. Steyn ja I.D. Watson, 1991: Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night. Part 2: Diagnosis of causation. *Bound. -Layer Meteorol.*, **56**, 339-358
- Patankar, S. V., 1980: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw-Hill, New York, 205 s.

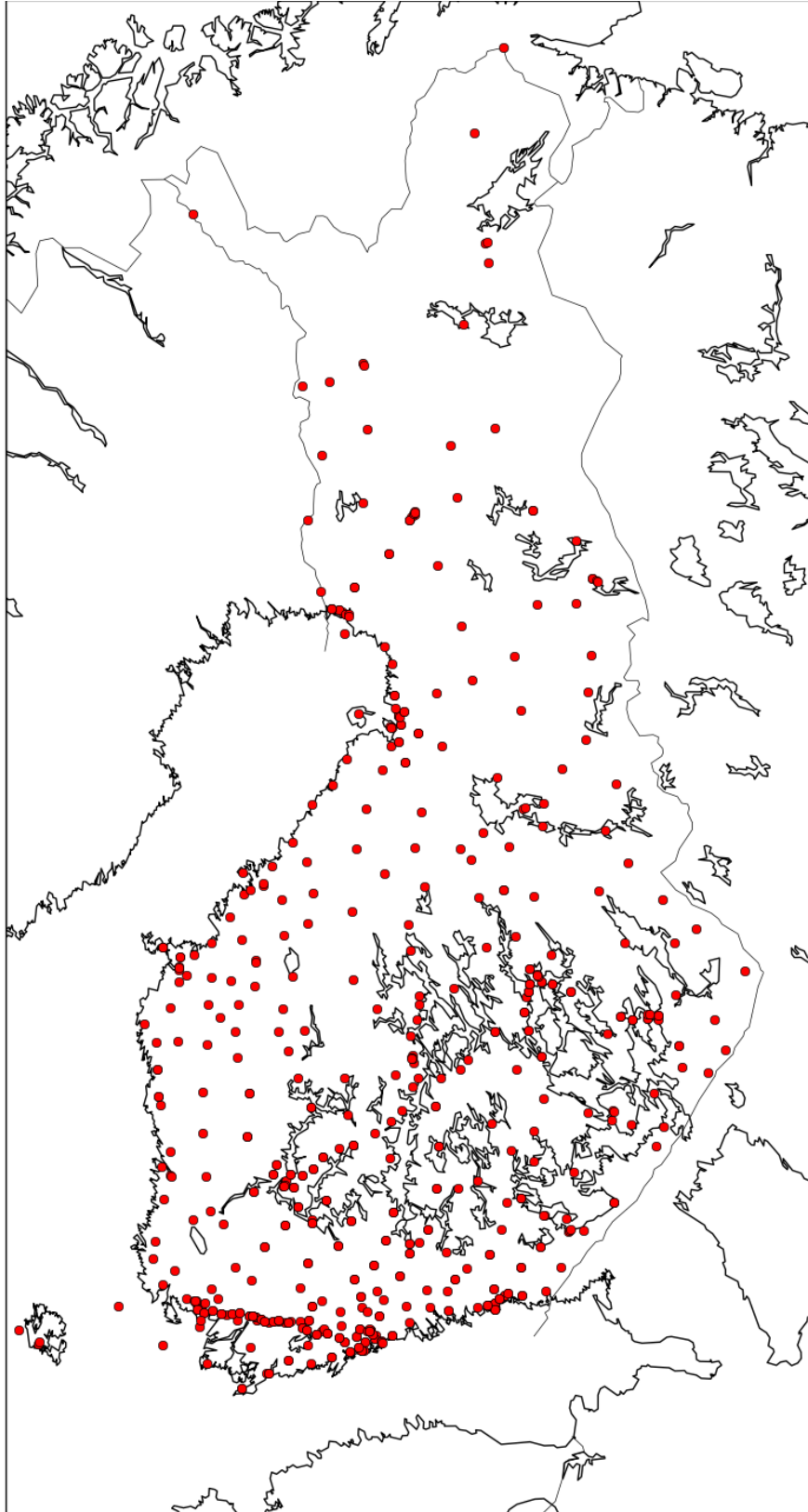
- Roddis, WMK, K. Maser ja A. J. Gisi, 1992: Radar pavement thickness evaluation for varying base conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1335**, 90-98.
- Saarikivi, P., 2012: *Development of mobile optical remote road condition monitoring in Finland*. 16th Conference of Standing International Road Weather Commission, saatavilla www.sirwec.org/helsinki2012.htm (viitattu 13.8.2013), 7 s.
- Saarikivi, P., J. Sipilä, M. Hippi ja P. Nurmi, 2007: *ColdSpots. Tarkkojen tiekohtaisten keliennusteiden kehittämishanke. Vaihe 2, kelimallien kehittäminen ja verifiointi*. AINO – julkaisuja, Helsinki, 50 s.
- Savijärvi, H., 2000: *Fysikaalinen meteorologia I*, Helsingin yliopisto, meteorologian laitos, Helsinki. 60 s.
- Seity, Y., P. Brousseau, S. Malardel, G. Hello, P. Bénard, F. Bouttier, C. Lac, V. Masson, 2011: The AROME-France Convective-Scale Operational Model. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 976–991.
- Senkova A.V., L. Rontu ja H. Savijärvi, 2007: Parametrization of orographic effects on surface radiation in HIRLAM. *Tellus*, **59A**, 279-291
- Shao J., P.J. Lister, G.D. Hart ja H.B. Pearson, 1996: Thermal mapping: reliability and repeatability. *Meteorol. Appl.* **3**, 325-330
- Shao, J., J. Swanson, R. Patterson, P. Lister ja A. McDonald, 1997: Variation of winter road topography and application of thermal mapping. *Meteor. Appl.*, **4(2)**, 131-137
- Suomen rakennusinsinöörien liitto, 2004: *Siltojemme historia*, Otavan kirjapaino OY, Keuruu, 368 s.
- Thompson, B. W., 1986: Small-scale katabatics and cold hollows. *Weather*, **41**, 146- 153
- Thornes, J. E. 1991: Thermal mapping and road-weather information systems for highway engineers. Teoksessa: A. Allen Howard Perry ja Leslie J. Symonsi: *Highway meteorology*, E & FN Spon, Lontoo, 39-67
- Thornes, J.E. ja J. Shao, 1991: A comparision of UK ice prediction models. *Meteorolog. Mag.* **120**, nro 1424, 51-57
- Tiehallinto, 2001: *Teiden talvihoito: Menetelmätieto*. Tiehallinto, 64 s.
- Tiehallinto, 2003: *Siltojen rakentamisen ja korjaamisen seuranta*, Seurantaraportti, osa 2. Tiehallinnon selvityksiä 3/2003, Helsinki. 85 s.
- Tiehallinto, 2004: *Tierakenteen suunnittelu*. Tiehallinto, Helsinki 74 s.
- Tiehallinto, 2009: *Tiefakta*. Tiehallinto, 52 s.
- Uden P. , L. Rontu, H. Järvinen, P. Lynch, J. Calvo, G. Cats, J. Cuxart, K. Eerola, C. Fortelius, J. A. Garcia-Moya, C. Jones, G. Lenderlink, A. McDonald, R. McGrath, B. Navascues, N. W. Nielsen, V. Ødegaard, E. Rodriguez, M. Rummukainen, R. Rõõm, K. Sattler, B. H.

Sass, H. Savijärvi, B. W. Schreur, R. Sigg, H.The, A.Tijm, 2002: *HIRLAM Scientific Documentation*, HIRLMAN-5 project, 146 s.

Vaisala, 2001: *Vaisala DRS511/DRS511B Road & Runaway Sensor*. Tekn. rap., Vaisala Oyj, Helsinki. B010115en-A. 2 s.

Vaisala, 2010: *Vaisala Remote Road Surface State Sensor DSC111*. Tekn. rap., Vaisala Oyj, Helsinki. B210470EN-B 2 s.

Liite A : Suomen tiesääasemat



Kuva A.1. Suomen tiesääasemat 2013. Kuvassa on myös käytöstä poistettuja asemia.